

**Untersuchung der Flammenankerung und der Flammenverlöschung
während des Zündprozesses von LOX/GCH₄**

**Investigation of flame anchoring and flame extinction
during the ignition process of LOX/GCH₄**

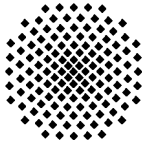
Bachelorarbeit von
cand. aer. Raphael Jost
IRS-20-S-044



[DLR-LA-RAK-ZU-DO-025](#)

Prüfer:
Prof. Dr. Stefan Schlechtriem
Betreuer:
M.Sc. Michael Börner
Dr. Justin Hardi

Institut für Raumfahrtssysteme, Universität Stuttgart
Oktober 2020



Aufgabenstellung Bachelorarbeit

für Herrn Raphael Jost

Untersuchung der Flammenankerung und der Flammenverlöschung während des
Zündprozesses von LOX/GCH₄

Investigation of flame anchoring and flame extinction during the ignition process of LOX/CH₄

Motivation:

Derzeit wird als Alternative zur in Europa verwendeten Treibstoffkombination Sauerstoff/Wasserstoff die Nutzung der Kombination Sauerstoff/Methan intensiv untersucht. Derzeit gibt es noch kein Raketentriebwerk, das sich mit dieser Treibstoffkombination im operativen Betrieb befindet.

Methan besitzt im Gegensatz zu Wasserstoff eine höhere Dichte. Dadurch kann die gleiche Brennstoffmasse in einem kleineren Tank gespeichert werden und Strukturgewicht eingespart werden. Durch den höheren Dampfdruck kann Methan mit weniger Aufwand gelagert werden. Andererseits besitzt die Kombination Sauerstoff/Methan signifikant andere Verbrennungseigenschaften, die sich vor allem auf den Zündprozess auswirken.

Daher müssen diese Prozesse und deren beeinflussende Parameter genauer untersucht und besser verstanden werden. Im Rahmen eines ESA Forschungsprojekts fanden daher am DLR Institut für Raumfahrtantriebe experimentelle Untersuchungen zur laserinduzierten Zündung von LOX/GCH₄ statt. Im Zuge der Bachelorarbeit sollen die Flammenankerung und Verlöschung der Verbrennungszone analysiert und dabei Intervalle oder Grenzwerte der erfolgskritischen Parameter identifiziert werden.

Aufgabenstellung:

1. Einarbeitung in die Thematik „Zündung von kryogenen Raketenantrieben“
 - Einarbeitung in den Aufbau der M3.1 Testanlage
 - Einarbeitung in Vorarbeiten zum Thema (Versuchsberichte und Vorauswertungen)
 - Transferskript für M3.1 Datenformat in P8 Datenformat
2. Anwendung & Adaption von P8-Routinen zur Bestimmung der transienten LOX-Injektionseigenschaften auf die Versuchsdaten
3. Identifikation von kritischen Parametern für LOX/GCH₄-Daten
 - Flammenankerung in Funktion von ROF, J, v_r, (We)
 - Verlöschen in Funktion von ROF, J, v_r, (We)
4. *Fakultativ: gleiches für LOX/GH₂-Versuche sowie Vergleich beider Kombinationen*
5. Dokumentation

Betreuer/-in intern: Dr. Justin Hardi / Michael Börner, M.Sc.

Bearbeitungsbeginn: 12.05.2020

Einzureichen spätestens: 12.09.2020

Prof. Dr. S. Schlechtriem
(Verantwortlicher Hochschullehrer)

Empfangsbestätigung:

Ich bestätige hiermit, dass ich die Aufgabenstellung sowie die rechtlichen Bestimmungen und die Studien- und Prüfungsordnung gelesen und verstanden

Unterschrift des/der Studierenden

Rechtliche Bestimmungen: Der/die Bearbeiter/in ist grundsätzlich nicht berechtigt, irgendwelche Arbeits- und Forschungsergebnisse, von denen er/sie bei der Bearbeitung Kenntnis erhält, ohne Genehmigung des/der Betreuers/in dritten Personen zugänglich zu machen. Bezüglich erreichter Forschungsleistungen gilt das Gesetz über Urheberrecht und verwandte Schutzrechte (Bundesgesetzblatt I/ S. 1273, Urheberrechtsgesetz vom 09.09.1965). Der/die Bearbeiter/in hat das Recht, seine/ihre Erkenntnisse zu veröffentlichen, soweit keine Erkenntnisse und Leistungen der betreuenden Institute und Unternehmen eingeflossen sind. Die von der Studienrichtung erlassenen Richtlinien zur Anfertigung der Bachelorarbeit sowie die Prüfungsordnung sind zu beachten.

Professoren und Privatdozenten des IRS:

Prof. Dr.-Ing. Stefanos Fasoulas (Geschäftsführender Direktor) · Prof. Dr.-Ing. Sabine Klinkner (Stellvertretende Direktorin) · Prof. Dr. rer. nat. Alfred Krabbe · (Stellvertretender Direktor) · Hon.-Prof. Dr.-Ing. Jens Eickhoff · Prof. Dr. rer. nat. Reinhold Ewald · PD Dr.-Ing. Georg Herdrich · Hon.-Prof. Dr. Volker Liebig · Prof. Dr.-Ing. Stefan Schlechtriem · PD Dr.-Ing. Ralf Srama

Erklärungen

Hiermit versichere ich, **Jost, Raphael**, dass ich diese **Bachelorarbeit** selbstständig mit Unterstützung des Betreuers / der Betreuer angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Die Arbeit oder wesentliche Bestandteile davon sind weder an dieser noch an einer anderen Bildungseinrichtung bereits zur Erlangung eines Abschlusses eingereicht worden.

Ich erkläre weiterhin, bei der Erstellung der Arbeit die einschlägigen Bestimmungen zum Urheberrecht fremder Beiträge entsprechend den Regeln guter wissenschaftlicher Praxis¹ eingehalten zu haben. Soweit meine Arbeit fremde Beiträge (z.B. Bilder, Zeichnungen, Textpassagen etc.) enthält, habe ich diese Beiträge als solche gekennzeichnet (Zitat, Quellenangabe) und eventuell erforderlich gewordene Zustimmungen der Urheber zur Nutzung dieser Beiträge in meiner Arbeit eingeholt. Mir ist bekannt, dass ich im Falle einer schuldhaften Verletzung dieser Pflichten die daraus entstehenden Konsequenzen zu tragen habe.

.....
Ort, Datum, Unterschrift

Hiermit erkläre ich mich damit einverstanden, dass meine **Bachelorarbeit** zum Thema:

„Untersuchung der Flammenankerung und der Flammenverlöschung während des Zündprozesses von LOX/GCH4“

in der Institutsbibliothek des Instituts für Raumfahrtssysteme ohne Sperrfrist öffentlich zugänglich aufbewahrt und die Arbeit auf der Institutswebseite sowie im Online-Katalog der Universitätsbibliothek erfasst wird. Letzteres bedeutet eine dauerhafte, weltweite Sichtbarkeit der bibliographischen Daten der Arbeit (Titel, Autor, Erscheinungsjahr, etc.).

Nach Abschluss der Arbeit werde ich zu diesem Zweck meinem Betreuer neben dem Prüfaxemplar eine weitere gedruckte sowie eine digitale Fassung übergeben.

Der Universität Stuttgart übertrage ich das Eigentum an diesen zusätzlichen Fassungen und räume dem Institut für Raumfahrtssysteme an dieser Arbeit und an den im Rahmen dieser Arbeit von mir erzeugten Arbeitsergebnissen ein kostenloses, zeitlich und örtlich unbeschränktes, einfaches Nutzungsrecht für Zwecke der Forschung und der Lehre ein. Falls in Zusammenhang mit der Arbeit Nutzungsrechtsvereinbarungen des Instituts mit Dritten bestehen, gelten diese Vereinbarungen auch für die im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Arbeitsergebnisse.

.....
Ort, Datum, Unterschrift

¹ Nachzulesen in den DFG-Empfehlungen zur „Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ bzw. in der Satzung der Universität Stuttgart zur „Sicherung der Integrität wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit Fehlverhalten in der Wissenschaft“

Kurzfassung

Diese Abschlussarbeit befasst sich mit der Analyse von charakteristischen Parametern für die Flammenankerung und der Flammenverlöschung bei Zündung von flüssigem Sauerstoff (LOX) und gasförmigem Methan (CH_4) in einer experimentellen Einzelinjektorbrennkammer unter Vakuumbedingungen.

Das Ziel dieser Ausarbeitung ist die Identifikation der Ankerung sowie Verlöschung der Flamme nach erfolgreicher Zündung anhand von spezifischen Parametern wie Impulsstrom-, Geschwindigkeitsverhältnis und dem Verhältnis von Oxidator- zu Brennstoffmassenstrom. Die hier betrachteten Testreihen zeigten alle eine erfolgreiche Zündung, eine Ankerung der Flamme und eine frühzeitige Verlöschung, welche nicht durch einen vorzeitigen Versuchsabbruch hervorgerufen wurde.

Die Analysen haben gezeigt, dass in den ausgewerteten Versuchen das Geschwindigkeits- und Impulsstromverhältnis den größten Einfluss sowohl auf die Ankerung als auch auf die Verlöschung haben könnte. Bei hohen Verhältnissen konnte ein Ankerungspunkt der Verbrennungszone näher am Injektor mit hohen Brennkammertemperaturen beobachtet werden. Niedrige Impulsstromverhältnisse zeigten eine Ankerung deutlich weiter stromabwärts mit einem längeren intakten Kern der Sauerstoffströmung.

Im Bezug auf die Verlöschung konnten keine eindeutig kritischen Parameterbereiche identifiziert werden, die in einem Verlöschen der Flamme resultiert haben. Es wurden zwar Tests in drei Gruppen mit ähnlichen Parameterverläufen festgestellt, doch die Werte zu den jeweiligen Verlöschungszeitpunkten befanden sich innerhalb der ausgewerteten Betriebsbereiche, eingegrenzt durch minimal und maximal erreichte Werte während der Verbrennung. Zusätzlich wurden Druckspitzen beobachtet, die durch unregelmäßige Verbrennung verursacht werden und die, innerhalb von 2 bis 3 Millisekunden, eine signifikante Variation des Massenstroms bei Einströmung des Sauerstoffs bewirkte.

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung	II
Selbstständigkeitserklärung	III
Kurzfassung	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Nomenklatur	VI
1. Einführung	1
1.1. Ziel der Arbeit	1
1.2. Laserinduzierte Zündung eines experimentellen RCS Triebwerks	2
2. Theoretische Grundlagen	3
2.1. Treibstoffkombination Sauerstoff und Methan	3
2.2. Charakterisierung des Strömungsfelds	3
2.2.1. Verhalten des Sauerstoffs	4
2.2.2. Geschwindigkeitsberechnung	7
2.2.3. Versuchs- und Strömungsparameter	9
3. Untersuchung der Flammenankerung und Flammenverlöschung	13
3.1. Versuchsauswahl	13
3.2. Flammenankerung	15
3.2.1. Parameterverhalten bei Ankerung	17
3.3. Flammenverlöschung	26
3.3.1. Parameterverhalten bei Verlöschung	26
4. Zusammenfassung	36
Literaturverzeichnis	38
A. Tabelle der Parameter	A-0
B. Diagramme	B-0

Nomenklatur

Lateinische Buchstaben

A	$[m^2]$	Fläche
c	$[\frac{J}{kg \cdot K}]$	Spezifische Wärmekapazität
h	$[\frac{J}{kg}]$	Spezifische Enthalpie
I	$[N \cdot s]$	Impuls
J	$[-]$	Impulsstromverhältnis
m	$[kg]$	Masse
p	$[bar]$	Druck
T	$[K]$	Temperatur
t	$[s]$	Zeit
v	$[\frac{m}{s}]$	Strömungsgeschwindigkeit
V	$[m^3]$	Volumen

Griechische Buchstaben

Δ	$[-]$	Differenz
ξ	$[-]$	Durchflusskoeffizient
ρ	$[\frac{kg}{m^3}]$	Dichte
χ	$[-]$	Anteil gasförmiger Sauerstoff

Indizes

cc	Brennkammer
f	Brennstoff
inj	Injektorkopf
l	flüssig
mix	Mischung
o	Oxidator
sp	spezifisch
p	bei konstantem Druck
r	Verhältnis
sto	stöchiometrisch
v	gasförmig

Abkürzungen

BK	Brennkammer
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ESA	Europäische Weltraumorganisation
GCH ₄	gasförmiges Methan
GH ₂	gasförmiger Wasserstoff
IRS	Institut für Raumfahrtsysteme
LOX	flüssiger Sauerstoff
OH*	angeregtes Hydroxyl-Radikal
OMS	Orbital Maneuvering System
RCS	Reaction Control System
ROF	Oxidator- zu Brennstoffmassenstromverhältnis
RP-1	Rocket Propellant 1

1. Einführung

1.1. Ziel der Arbeit

Die Industrie der Raumfahrtantriebe sucht nach vielversprechenden alternativen Raketentreibstoffen. Bisher konnte sich weitgehend Wasserstoff als Brennstoff etablieren, da es einen deutlich höheren spezifischen Impuls liefert als Brennstoffe wie beispielsweise Hydrazin oder RP-1. Dennoch haben Untersuchungen der letzten zwei Jahrzehnte ergeben, dass Methan viele Vorteile bietet, welche trotz einiger Nachteile für eine Nutzung sprechen. Wasserstoff stützt sich auf unzählige Forschungsarbeiten und fundierten Kenntnissen aus vergangenen Entwicklungen in der Raumfahrt. Für Methan findet sich im Vergleich dazu jedoch deutlich weniger Forschung.

Wichtige Bestandteile eines Raketenantriebes sind die Brennkammer und die Treibstoffinjektoren. Gerade diese wichtigen Bauteile ermöglichen einen effizienten und stabilen Betrieb mit deren Hilfe die Atomisation und Mischung der Treibstoffe definiert wird. Es existieren verschiedenste Injektorgeometrien, wobei die geläufigste Variante für die Treibstoffkombination von flüssigem Sauerstoff und Wasserstoff (LOX/H₂) ein Koaxialinjektor ist, bei dem der Brennstoff (H₂) über den äußeren Ring und Oxidator (LOX) aus dem mittleren Rohr austritt [1]. Es gibt zu Koaxialinjektoren für LOX/H₂ im Gegensatz zu LOX/CH₄ genügend Forschungsergebnisse um zuverlässig ermitteln zu können welche Parameter Einfluss auf den Betrieb haben [2, 3, 4, 5].

Das Ziel der Forschung dieser Arbeit ist es daher für LOX/GCH₄ Versuche einer experimentellen Brennkammer mit einer Koaxialinjekorgeometrie auszuwerten und aufzuzeigen, welche Parameter bei dieser Treibstoffkombination Einfluss auf die Flammenankerung und Flammenverlöschung haben. Diese Erkenntnisse sind wichtig und nötig um in Zukunft Weiterentwicklungen am Injektordesign vornehmen zu können und die Einströmeigenschaften der Treibstoffe für eine effiziente, stabile und sichere Verbrennung zu optimieren.

In diesem Kapitel (1) wird, nach der eben erwähnten Zielsetzung, eine kurze Einführung in den Versuchsaufbau der untersuchten Tests (1.2) gegeben. Des Weiteren wird im nachfolgenden Kapitel (2) ein Überblick der theoretischen Grundlagen geliefert. Behandelt werden darin, neben der Treibstoffe (2.1), auch die Berechnung der Stoffzustandsgrößen (2.2.1, 2.2.2) sowie der untersuchten Versuchsparameter (2.2.3). Den Hauptteil bildet die Untersuchung der Flammenankerung und Flammenverlöschung (3). Hierin wird gezeigt, welche Versuche genauer betrachtet wurden (3.1). Vor allem werden zusätzlich, jeweils für die Ankerung (3.2) und Verlöschung (3.3) der Flamme, die einzelnen Versuchsparameter ausgewertet. Abgeschlossen wird mit einer Zusammenfassung (4).

1.2. Laserinduzierte Zündung eines experimentellen RCS Triebwerks

Die Versuchsreihen, auf denen die nachfolgenden Auswertungen basieren, sind Teil einer 2011 durchgeführten Machbarkeitsstudie der Europäischen Weltraumorganisation (ESA). Die Versuche fanden hierzu am Prüfstand M3.1 des DLR Instituts für Raumfahrtantriebe in Lampoldshausen statt. Das primäre Ziel der Studie war es, alternative Treibstoffe für Lageregelungstriebwerke (RCS/OMS) und damit verbundene Zündmechanismen zu untersuchen.

Hierzu wurde eine experimentelle Brennkammer mit 400 N Schub entworfen, die mit einem Einzelinjektorelement ausgestattet wurde und für eine Brennkammerdruck von 2 bar ausgelegt war. Die Zündung wurde durch ein Tabletop-Lasersystem oder einem miniaturisierten Laser induziert, welcher direkt auf der Brennkammer montiert wurde [6]. Ein besonderes Merkmal des Prüfstands M3.1 ist die Möglichkeit, Einspritz- und Zündbedingungen der kryogenen Medien unter Vakuumbedingungen zu untersuchen. Dazu ist, wie in Bild 1.1 zu sehen, ein Vakuumentank mittels Flansch direkt an der Brennkammer befestigt.

Um die Betriebsbedingungen des Prüfstands zu überwachen und um sich ein Bild des vorliegenden Strömungsfelds in jedem einzelnen Versuch zu machen sind sowohl vor dem, als auch innerhalb des Injektors sowie in der Brennkammer Sensoren verbaut. Es wurden Temperatur, Druck und Massenstrom mit unterschiedlichen Aufnahmefrequenzen gemessen.

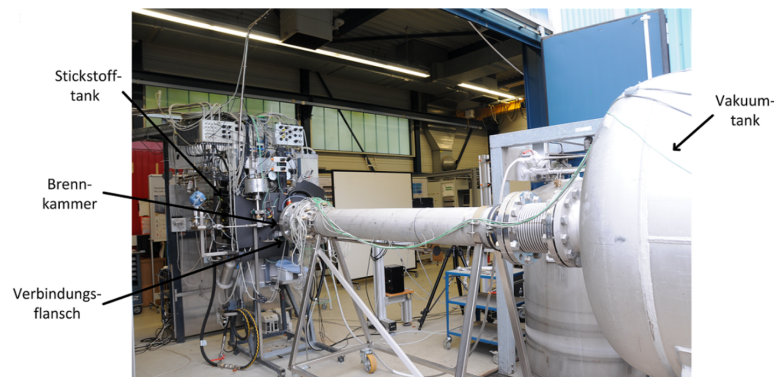


Bild 1.1.: Testaufbau am Prüfstand M3.1 [7]

Die halb-zylindrische Brennkammer ist mit zwei optischen Zugängen aus Quarzglas versehen. Zwei Verfahren kommen für eine optische Analyse der Versuche zum Einsatz: Schlierenaufnahmen um sich ein Bild der Dichteunterschiede einströmender Medien zu machen und zum anderen OH*-Chemielumineszenzaufnahmen, welche Aufschluss über die Qualität und Intensität der Verbrennung liefern. Der detaillierte Versuchsaufbau, inklusive Sensorstandorte und genaue Geometriedaten können aus der Veröffentlichung von Manfletti et al. entnommen werden [6].

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Treibstoffkombination Sauerstoff und Methan

Chemische Raketentreibstoffe liefern den Schub einer Rakete, indem die Mischung bestehend aus Brennstoff und Oxidator verbrannt wird. Der Brennstoff produziert dabei, mithilfe von Sauerstoff als Oxidator, ein Gasgemisch bei hohem Druck und Temperaturen, das den nötigen Vortrieb liefert. Klassifiziert werden die unterschiedlichen Medien nach ihren Aggregatzuständen, wie in den nachfolgenden Versuchen flüssiger Sauerstoff (LOX) und gasförmigen Methan (GCH₄). Sauerstoff mit Methan als Brennstoff ist seit langem im Fokus der Forschung und entwickelt sich zu einer attraktiven Treibstoffalternative für zukünftige, chemische Raketenantriebe. Beispielsweise wird von ArianeGroup SAS, ein wiederverwendbares Triebwerk, unter dem Namen PROMETHEUS, für die Europäische Raumfahrtorganisation (ESA) entwickelt, das mit flüssigem Methan als Brennstoff operiert (LOX/LCH₄) [8].

Gründe für den verstärkten Fokus auf Methan sind viele Vorteile, welche in Kombination mit Sauerstoff, trotz einiger Nachteile, für eine Nutzung sprechen. So hat CH₄ beispielsweise eine Dichte, die unter Normalbedingungen bei $0,7175 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ liegt. Diese im Vergleich zu Wasserstoff ($0,0899 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$) höhere Dichte macht es möglich kleinere Tanks zu verwenden und dadurch Strukturmasse einzusparen. Das Design von Pumpensystemen kann aufgrund der Dichteverhältnisse beider Stoffe vereinfacht werden [9]. Bei einem Siedepunkt von $111,65 \text{ K}$ ist außerdem die Handhabung des Methans, im Bezug auf die Lagerung sowie der Nutzung im Weltraum und der dazu weniger aufwändigeren Isolierung, deutlich einfacher [7].

Alternative Treibstoffe wie Methan bringen aber auch Herausforderungen mit sich, die näher betrachtet werden müssen. Vorhandene Bauteilentwicklungen, wie beispielsweise Injektorgeometrien, können durch unterschiedliche Eigenschaften sowie Strömungs- und Zündverhalten der Stoffe nicht direkt übernommen werden [10]. So begünstigt ein Injektor mit zurückgezogenem LOX Rohr die Verbrennung mit Wasserstoff. Bei Methan sorgt diese Modifikation jedoch für eine ungünstige Verbrennungsdynamik, welche in einer abgehobenen Flamme resultieren kann und in sehr ungünstigen Fällen damit zu Verbrennungsinstabilitäten führt [11].

2.2. Charakterisierung des Strömungsfelds

Für eine stabile Verbrennung muss die Strömung in der Brennkammer genauer betrachtet werden. Dafür sind rund um die Modellbrennkammer Sensoren verbaut, mit denen sich die thermodynamischen Zustandsgrößen der einzelnen Medien exakt aufzeichnen und analysieren lassen. Besonderer Fokus wird hier auf den Sauerstoff gelegt, da das Verhalten durch eine vorhandene Zweiphasenströmung mathematisch aufwändiger modelliert werden muss. In den folgenden Kapiteln wird daher eine

Übersicht der vorherrschenden Strömung gegeben und einzelne Parameter vorgestellt anhand derer man die Betriebsbereiche der Brennkammer charakterisieren kann.

2.2.1. Verhalten des Sauerstoffs

Wie bereits erwähnt, ist es nötig den Sauerstoff genauer zu untersuchen, da eine Zweiphasenströmung vorliegt. Diese erschwert weitergehende Berechnungen und Modellierungen des Strömungsfelds. In den folgenden Kapiteln wird aus diesem Grund gezeigt, welche Annahmen getroffen werden um den Sauerstoff detaillierter abzubilden.

Flashing

Vom Tank bis hin zum Ventil liegt der Sauerstoff, bei den hier untersuchten Experimenten, zwischen 1,7 bis 3 bar und einer Temperatur von etwa 95 K in flüssiger Phase vor. Auf der Brennkammer zugewandten Seite des Ventils sorgt der Vakuumtank dafür, dass vor Versuchsbeginn der Brennkammerdruck bei minimal 20 mbar liegt. Bei Öffnung des Ventils fließt der Sauerstoff durch die Leitung und erreicht am Injektorkopf Temperaturen und Drücke nahe der Sättigungslinie wie in Diagramm 2.1 zu sehen ist, weshalb die Strömung zum Teil in flüssiger und gasförmiger Phase vorliegt.

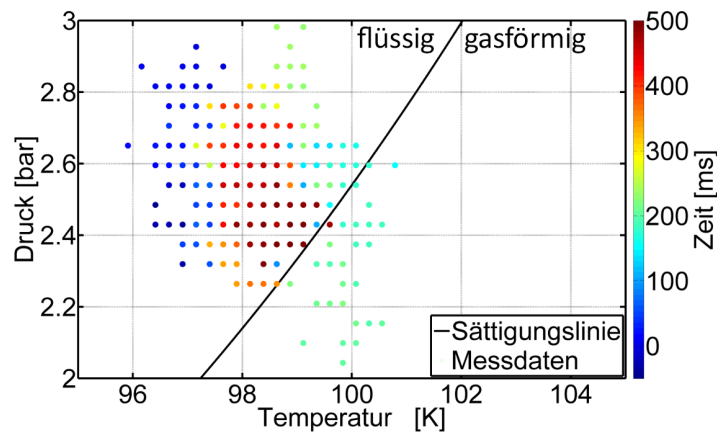


Bild 2.1.: Phasendiagramm für Sauerstoff bei Kaltgastest (Test-ID: 20111025_05) [7]

Testbezeichnungen werden nachfolgend aus Gründen der Übersichtlichkeit abgeändert und sind für genaue Identifikationsnummern in Tabelle 3.1 nachzulesen.

Die Dichte von flüssigem Sauerstoff ist mit über $1 \frac{kg}{m^3}$ deutlich höher als im gasförmigen Zustand von ungefähr $10 \frac{g}{m^3}$. Daher ist flüssiger Sauerstoff in den Schlierenaufnahmen 2.2 nahezu komplett schwarz, in Gasform dagegen grau. In den Aufnahmen lässt sich der Injektorkopf am linken Bildrand erkennen. Die Strömung verläuft daher nach rechts. Man sieht ebenso, dass beide Phasen gleichzeitig vorliegen und kein instantaner Wechsel zwischen der flüssigen und der gasförmigen Phase

stattfindet. Den Übergang des Sauerstoffs vom flüssigen, überhitzten Zustand in einen gasförmigen Zustand nennt man Flashverdampfung, kurz Flashing. Flashing tritt in den betrachteten Versuchen in den Sauerstoffleitungen am Injektorkopf entlang in die Brennkammer hinein auf.

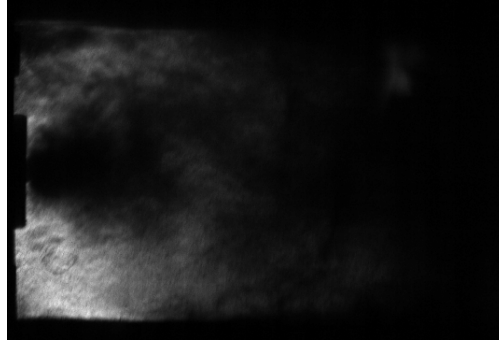


Bild 2.2.: Schlierenaufnahme bei Sauerstoffeinspritzung Test A

Grundsätzlich hat Flashing sowohl Vor- als auch Nachteile. Wenn es wie bei den vorliegenden Versuchen mit Methan in den Leitungen vor dem Injektoraustritt auftritt, sorgt dieses Phänomen für einen instationären Massenstrom welcher nicht wünschenswert für eine stabile Verbrennung ist. Trotz dieses erheblichen Nachteils gibt es einige Vorteile. Flashing sorgt beispielsweise dafür, dass der Sauerstoff gasförmig innerhalb kürzester Zeit in der gesamten Brennkammer verteilt wird. Ebenso wird eine kleinere Energiemenge benötigt um das Gemisch auf Zündtemperatur zu bringen [12].

Dichteberechnung

Versucht man die Dichte des Sauerstoffs ohne vorläufiges Festlegen eines Aggregatzustands zu berechnen, so erhält man durch den Phasenwechsel einen sprunghaften Dichteverlauf. Dabei schwankt der Wert zwischen $10 \frac{g}{m^3}$ im Fall einer gasförmigen Einphasenströmung und $1 \frac{kg}{m^3}$ für den flüssigen Fall wobei, wie im vorherigen Kapitel 2.2.1 bereits erwähnt, in der Realität kein sofortiger Wechsel stattfindet. Um daher eine genauere Abbildung der Dichte zu erhalten kann man den Anteil des gasförmigen Sauerstoffs mit folgender Gleichung annähern [7]:

$$\chi = \frac{c_p \cdot (T_{inj} - T_{sat}(p_{cc}))}{\Delta h_v} \quad (2.1)$$

Berechnet man nun für jeden Zeitpunkt mithilfe der Temperatur im Injektor T_{inj} , der Sättigungstemperatur bei momentanem Brennkammerdruck $T_{sat}(p_{cc})$ und der Verdampfungsenthalpie Δh_v , den Anteil des verdampften Sauerstoffs χ , erhält man wie in Diagramm 2.3 zu sehen eine zeitaufgelöste Abschätzung. Die gemessenen Temperaturen werden mit einer Frequenz von 1 kHz aufgenommen, die Druckwerte dagegen mit 10 kHz. Für die Berechnungen wird daher die Aufnahmefrequenz der

Temperatur beibehalten, da diese im Detail ausreicht, die des Drucks werden auf 1 kHz reduziert. In Abbildung 2.3 lässt sich erkennen, dass ein Druckanstieg in der Brennkammer, verursacht durch die Verbrennung, zu einem Abfall des verdampften Sauerstoffs und damit zu einer vorwiegend flüssigen Sauerstoffströmung führt. Nach Verlöschung steigt der Anteil aufgrund des gefallenen Brennkammerdrucks und der damit verbundenen geringeren Sättigungstemperatur des Sauerstoffs $T_{sat}(p_{cc})$. Dieses Verhalten lässt sich ebenso in allen anderen untersuchten Versuchsläufen feststellen.

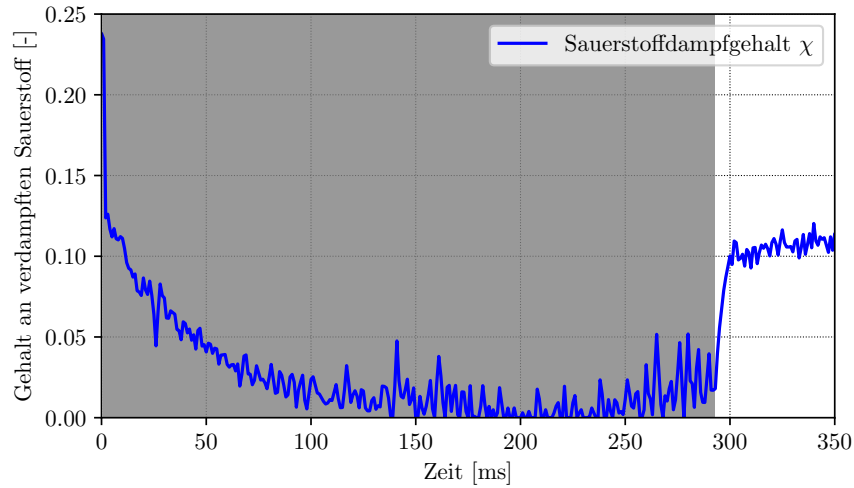


Bild 2.3.: Anteil an gasförmigen Sauerstoff, Test A

Mit Festlegen der Phase kann man die Dichte des Sauerstoffs jeweils für den flüssigen Anteil $\rho_{l,ox}$ und den gasförmigen Anteil $\rho_{v,ox}$ berechnen. Mit dem Sauerstoffdampfgehalt χ lässt sich somit die Sauerstoffdichte der Zweiphasenströmung $\rho_{mix,ox}$ annähern [13]:

$$\rho_{mix,ox} = \rho_{v,ox} \cdot \chi + \rho_{l,ox} \cdot (1 - \chi) \quad (2.2)$$

In Bild 2.4 auf der nächsten Seite wird nun deutlich welchen Einfluss die Berücksichtigung der zwei Phasen auf die Dichteberechnung hat. Je niedriger der Sauerstoffdampfgehalt, desto höher ist die Dichte der Zweiphasenströmung. Nach Verlöschung fällt die Sauerstoffdichte ab, da der Gehalt an verdampften Sauerstoff wieder zu nimmt.

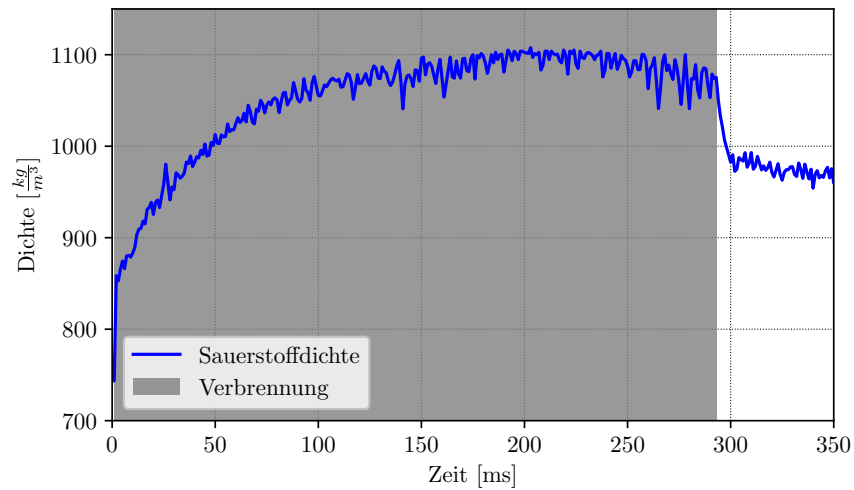


Bild 2.4.: Dichteverlauf für Sauerstoff, Test A

2.2.2. Geschwindigkeitsberechnung

Eine wichtige Berechnungsgrundlage der nachfolgenden Kennzahlen bildet die Ermittlung der Geschwindigkeit der einzelnen Treibstoffe. Die Basis hierfür stellt der Massenstrom dar, der durch die Coriolissensoren mit einer Aufnahmefrequenz von 100 Hz aufgenommen wird. In Abbildung 2.5 sieht man die Auswertung der Sensoren jeweils für Methan und Sauerstoff, gemessen in $\frac{g}{s}$ über der Versuchsdauer.

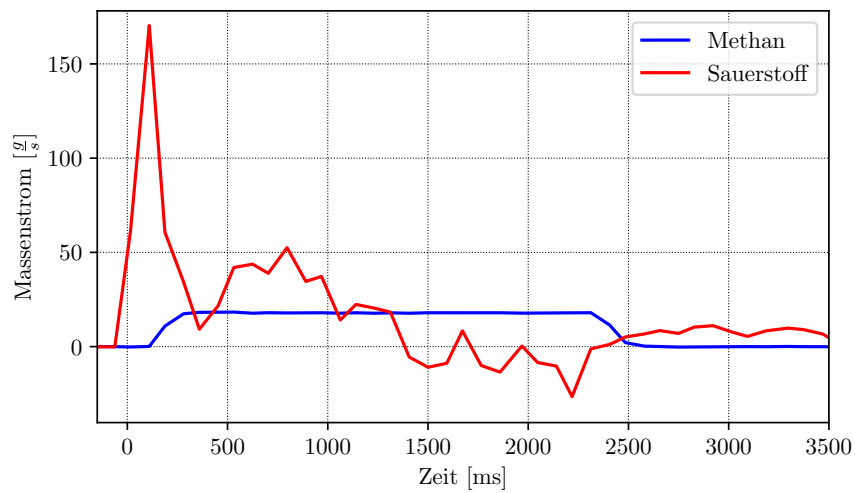


Bild 2.5.: Coriolis-Sensordaten für Test A

Die Auflösung der Datenpunkte ist durch die niedrige Aufnahmefrequenz für transiente Vorgänge gering, wie bei der Einspritzung des Sauerstoffs zum Zeitpunkt $t = -20 \text{ ms}$ zu sehen ist. Die Brennstoffventilöffnung ist zeitlich auf die Zündung bei $t = 0 \text{ ms}$ eingestellt. Die Coriolissensoren mitteln Werte über den Zeitraum bis zum nächsten Datenpunkt, wodurch eine Verzögerung entsteht, die 110 ms nach Zündung am ansteigenden Methanmassenstrom erkennbar ist. Der Sauerstoffmassenstrom in Bild 2.5 fällt nach $t = +550 \text{ ms}$ sogar soweit ab, dass negative Werte erreicht werden. Dieses Verhalten wird durch die Schließung des Sauerstoffventils zu diesem Zeitpunkt erklärt. Nach Ventilschließung erfährt der Sauerstoff vor dem Ventil durch weitere Einströmung einen höheren Druck. Aufgrund der Sensorlage stromaufwärts des Ventils, wird weiterhin ein Massenstrom detektiert bis der Druck am Ventil ab $t = +1400 \text{ ms}$ höher ist als am Sensor und ein Rückfluss stattfindet bis in der gesamten Leitung etwa ab $t = +2500 \text{ ms}$ ein Druckgleichgewicht herrscht.

Mithilfe des Massenerhaltungssatzes lässt sich mit dem gemessenen Massenstrom \dot{m} , der Stoffdichte ρ und der Injektoraustrittsfläche A_{inj} die Horizontalgeschwindigkeit u der beiden Medien im Injektor bestimmen [13]:

$$u(t) = \frac{\dot{m}(t)}{\rho(t) \cdot A_{inj}} \quad (2.3)$$

Gerade für die Darstellung der transienten Vorgänge, die bei der Flammenankerung und Verlöschung auftreten ist eine Auflösung von 100 Hz zu unpräzise. Die Druckwerte hingegen werden mit einer reduzierten Aufnahmefrequenz von 1 kHz abgebildet. Deshalb wird die Strömungsgeschwindigkeit mithilfe des Durchflussbeiwerts ξ unter der Annahme ermittelt, dass der Beiwert sowohl im transienten als auch im stationären Bereich konstant bleibt [7]:

$$u(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p(t)}{\rho(t) \cdot \xi}} \quad (2.4)$$

So kann über die Druckdifferenz von Injektor zur Brennkammer $\Delta p(t) = p_{inj}(t) - p_{cc}(t)$ mit dem erwähnten Durchflussbeiwert ξ und der zeitaufgelösten Dichte $\rho(t)$ die Geschwindigkeit der Medien $u(t)$ berechnet werden. Durch den konstant angenommenen Durchflussbeiwert, kann dieser über zeitlich gemittelte Werte wie folgt berechnet werden:

$$\xi = \frac{2 \cdot \overline{\Delta p}}{\bar{\rho} \cdot \bar{u}^2} \quad (2.5)$$

Der Geschwindigkeitsverlauf lässt sich somit detailliert über der Zeit darstellen, wie in Abbildung 2.6 für Methan dargestellt ist. Die angezeigten gemittelten Werte berechnen sich zu einem gegebenen Zeitpunkt durch das arithmetische Mittel der vorangegangenen 5 Millisekunden. Diese Festlegung wird in allen weiteren Diagrammen mit vorhandener Mittlung genutzt.

Die Strömungsgeschwindigkeit fällt zu Beginn der Verbrennung ab. Zurückzuführen ist der Abfall auf die geringer werdende Druckdifferenz zwischen Injektorkopf und Brennkammer bei bestehender Verbrennung und somit hohem Brennkammerdruck, wie in Gleichung 2.4 nachvollziehbar. Gerade durch den stark schwankenden Druck innerhalb der Brennkammer ist die Geschwindigkeit am Injektoraustritt ebenso stark oszillierend. Im Laufe der Verbrennung steigt die Geschwindigkeit, da die Methantemperatur am Injektor zunimmt und für eine abfallende Dichte sorgt. Nach der Verlöschung steigt die Methangeschwindigkeit wieder und unterliegt nur sehr kleinen Schwankungen.

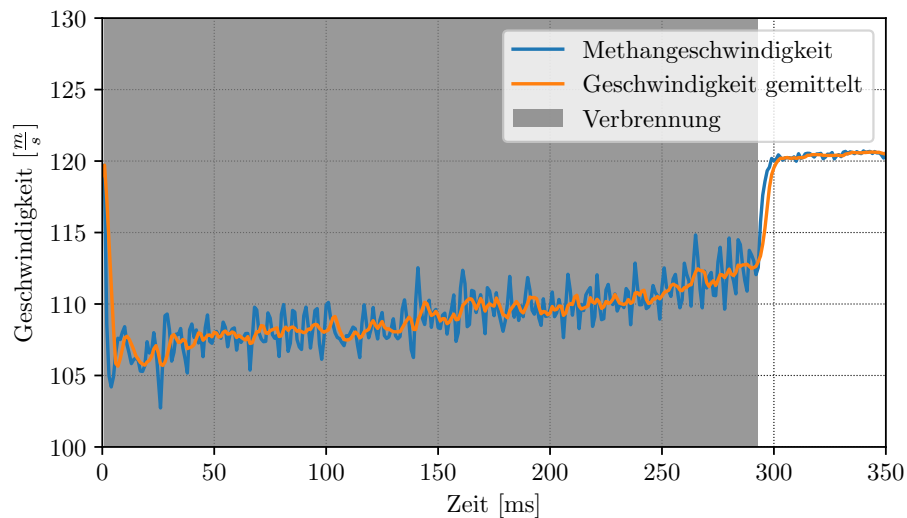


Bild 2.6.: Berechnete Methangeschwindigkeit Test A

2.2.3. Versuchs- und Strömungsparameter

Aufgrund der Komplexität und schwierigen Modellierung der Heißgasströmung werden Kennzahlen und Parameter genutzt, mit denen sich die Strömungsvorgänge charakterisieren lassen. Dimensionslose Kennzahlen bieten ebenfalls eine Vergleichbarkeit verschiedener Einströmungskonfigurationen. Ein prominentes Beispiel hierfür ist das Verhältnis von Oxidator- zu Brennstoffmassenstrom, kurz ROF. Für eine Auswertung der Strömungsverhältnisse innerhalb der Brennkammer sind ebenso Kennzahlen wie das Geschwindigkeitsverhältnis, Dichteverhältnis oder dem Impulsstromverhältnis wichtig. Diese geben nämlich zusätzlich Aufschluss über die Zerstäubungs- und Zerfallsvorgänge. Da das Impulsstromverhältnis das Dichteverhältnis als Faktor mit einbezieht, wird auf eine separate Auswertung des zeitabhängigen Dichteverhältnisses verzichtet. In den folgenden Kapiteln wird daher genauer auf die Parameter ROF (2.2.3), dem Geschwindigkeitsverhältnis (2.2.3) und dem Impulsstromverhältnis (2.2.3) eingegangen.

Oxidator- zu Brennstoffmassenstromverhältnis (ROF)

Eine der wichtigsten Kennzahlen ist das Massenstromverhältnis von Oxidator zu Brennstoff. Dieses Mischungsverhältnis charakterisiert die globalen Effekte der Verbrennung, welche eine grundsätzliche chemische Reaktion der Stoffe erst ermöglicht. Definiert wird das ROF durch den Oxidatormassenstrom \dot{m}_o von Sauerstoff und dem Brennstoffmassenstrom \dot{m}_f von Methan.

$$ROF = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_f}. \quad (2.6)$$

Intuitiv könnte man meinen, dass eine chemisch optimierte Mischung der Stoffe, ein optimales Verhältnis für den Betrieb einer Brennkammer darstellt. Diese so genannte stöchiometrische Mischung resultiert aus der chemisch optimalen Reaktion der beiden Reaktanten O_2/CH_4 . Zur Verbrennung wird genau soviel Sauerstoff hinzugegeben, wie mit Methan reagieren kann. Durch gegebener Molmasse bei CH_4 von $16,04 \frac{g}{mol}$ und O_2 von $32 \frac{g}{mol}$ ergibt sich daher:

$$ROF_{sto} = \frac{2 \cdot 32 \frac{g}{mol}}{16,04 \frac{g}{mol}} = 3,99. \quad (2.7)$$

Das stöchiometrische Verhältnis sorgt für die höchste Flammentemperatur, jedoch hat sich gezeigt dass es für den spezifischen Impuls und damit für den Betrieb vorteilhafter ist, Triebwerke mit einer brennstoffreicheren Mischung zu betreiben, wie man in Abbildung 2.7 sehen kann. Das ist darin begründet, dass die Verbrennungsprodukte bei stöchiometrischem Verhältnis eine insgesamt geringere molare Masse vorweisen als Verbrennungsprodukte mit einem höheren Anteil an Brennstoff. Eine höhere molare Masse der Produkte resultiert in einer höheren Düsenaustrittsgeschwindigkeit und sorgen somit, für brennstoffreichere Mischungsverhältnisse, für ein leistungsfähigeres Triebwerk [14]. Für ein LOX/GCH₄ Triebwerk mit angenommenem Brennkammerdruck von 150 bar liegt ein optimales ROF im Bereich von 3,3 bis 3,6 [15]. Man kann somit berechnen, dass der Wert des optimalen ROF bei fallenden Brennkammerdrücken abnimmt, wie in Abbildung 2.7 zu sehen ist. Für sehr geringe Brennkammerdrücke, wie in den vorliegenden Versuchen, kann somit das Mischungsverhältnis des maximalen spezifischen Impulses durchaus unter einem ROF von 3 liegen.

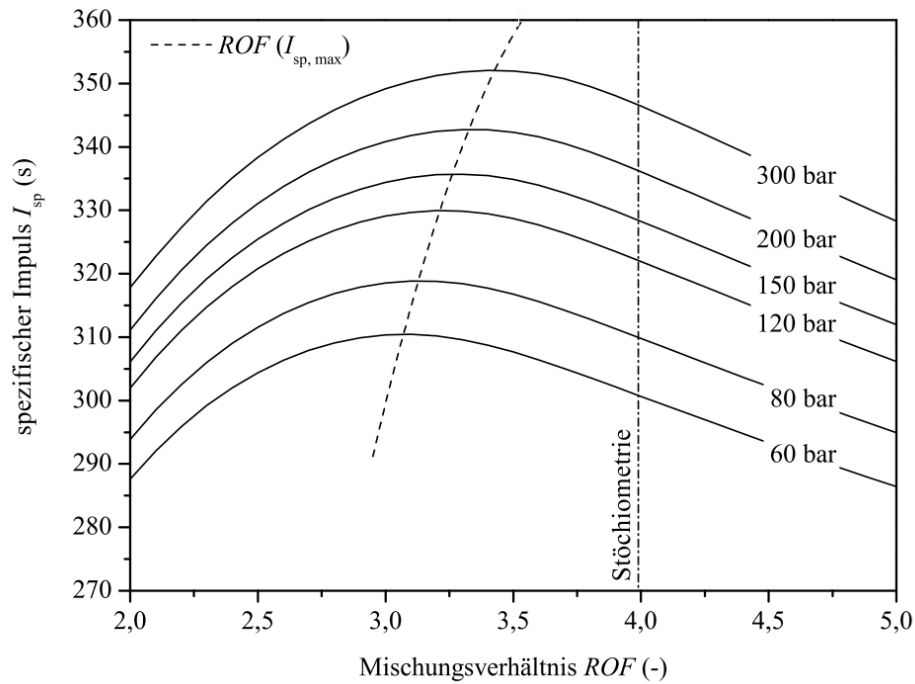


Bild 2.7.: Spezifischer Impuls über ROF für LOX/CH4 auf Meereshöhe [15]

Geschwindigkeitsverhältnis

Um die Geometrie der Koaxialinjektoren mit einzubeziehen werden Kennzahlen wie das Injektoraustrittsflächenverhältnis oder das Geschwindigkeitsverhältnis genutzt:

$$A_r = \frac{A_f}{A_o}. \quad (2.8)$$

und

$$v_r = \frac{v_f}{v_o}. \quad (2.9)$$

Bei den vorliegenden Versuchen besitzt das LOX Rohr einen Durchmesser von $2,4 \text{ mm}$, womit sich eine Austrittsfläche des Oxidators zu $4,52 \text{ mm}^2$ ergibt. Die Methanaustrittsfläche erhält man über den CH4 Rohrrinnendurchmesser 5 mm und dem LOX Rohraußendurchmesser $3,2 \text{ mm}$. Diese ist $11,59 \text{ mm}^2$ groß, womit sich ein Flächenverhältnis $A_r = 2,56$ ergibt. Yatsuyanagi et al. [16] nutzten in einer Studie für 18 Injektoren ein Verhältnis von 1,40, für ein 6 kN Triebwerk bei einem ROF von 2,2 – 5,0 und Brennkammerdrücken von 3,1 – 5,2 bar. Jedoch wurde dabei ein Injektordesign mit zurückgezogenem LOX Rohr der Länge $2,25 \text{ mm}$ genutzt.

Man kann annehmen, dass ein hohes Geschwindigkeitsverhältnis größere Scherkräfte und somit eine bessere Durchmischung der beiden Treibstoffe bewirkt. Dies ist jedoch nur bis zu einem gewissen Grad vorteilhaft. Bei sehr viel höheren Werten ist die

Wirkung vernachlässigbar klein und kann des Weiteren zu einer Verschlechterung der Durchmischung der Strömung führen. Laut Yang et al. [10] hat sich herausgestellt, dass das Geschwindigkeitsverhältnis ein wichtiger Parameter im Bezug auf die Verbrennungsinstabilität und der Verbrennungseffizienz ist.

Es wurde, im Zuge einer Stabilitätsbetrachtung der Verbrennung [17], ein Zusammenhang zwischen dem Geschwindigkeitsverhältnis und dem Mischungsverhältnis gefunden. Für ein gegebenes ROF kann man demnach das, für eine stabile Verbrennung nötige, minimale Geschwindigkeitsverhältnis berechnen. Da sich Mischungsverhältnisse für Triebwerke mit Methan, wie im vorherigen Kapitel erwähnt, zwischen 3 und 4 bewegen kann man laut Jensen [17] für ein $\text{ROF} = 3,4$ ein minimales Geschwindigkeitsverhältnis von etwa $v_r \approx 8$ annehmen. Da die in dieser Arbeit betrachteten Versuche andere Operationsparameter wie Brennkammerdruck, Injektorgeometrie und Dometemperatur und Druck aufweisen, muss hinterfragt werden inwiefern eine Übertragbarkeit sinnvoll ist. Die Geschwindigkeitsverhältnisse bei Yatsuyanagi et al. [16] bewegen sich zwischen 4,44 und 27,31.

Zusätzlich sollte bei der Betrachtung der Geschwindigkeiten auch die Flammengeschwindigkeit berücksichtigt werden. Fiock [18] identifizierte bei einer stöchiometrischen Mischung von Methan und Sauerstoff, bei Umgebungsdruck und Raumtemperatur eine laminare Flammengeschwindigkeit von $3,93 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Demnach müsste die lokale mittlere Strömungsgeschwindigkeit mit der Flammengeschwindigkeit übereinstimmen oder geringer sein, um eine erfolgreiche Ankerung der Flamme zu gewährleisten. Für eine genaue Analyse müssten Flammengeschwindigkeiten bei höheren Drücken und unter den vorherrschenden Bedingungen, beispielsweise dem brennstoffreichen Mischungsverhältnis, identifiziert werden.

Impulsstromverhältnis

Ein weiterer Parameter, um die Verbrennung zu charakterisieren, ist das Impulsstromverhältnis oder häufig genannt J-Zahl:

$$J = \frac{(\rho \cdot u^2)_f}{(\rho \cdot u^2)_o}. \quad (2.10)$$

Es setzt bei einer coaxialen Einspritzung die dynamischen Drücke oder den Impulsstrom ($\rho \cdot u^2$) des Brennstoffs und des Sauerstoffs ins Verhältnis. Es hat sich in der Vergangenheit durch experimentelle Versuche ergeben, dass diese dimensionslose Kennzahl vor allem bei der Zerstäubung des Strahls eines Koaxialinjektors von Bedeutung ist. Die J-Zahl kann Kräfte repräsentieren, die hauptverantwortlich für den Strahlzerfall von flüssigem Sauerstoff bei Koaxialinjektoren sind. Demnach führen niedrige J-Zahlen zu einem längeren intakten Sauerstoffstrahl. Oberhalb eines kritischen Impulsstromverhältnisses von $J_{krit} \approx 35$ kommt es laut Villermaux [4], am Austritt des Injektors, zu einer Rezirkulationsblase und niederfrequenten Instabilitäten [15].

3. Untersuchung der Flammenankerung und Flammenverlöschung

In den folgenden Kapiteln werden die Versuchsreihen zur laserinduzierten Zündung einer Modellbrennkammer genauer untersucht und nach Tests gefiltert, die für eine Auswertung am besten geeignet sind. Anschließend werden die ausgewählten Versuche betrachtet, wobei auf die Parameter ROF, Geschwindigkeitsverhältnis sowie dem Impulsstromverhältnis genauer eingegangen wird.

3.1. Versuchsauswahl

Insgesamt fanden am Teststand M3.1 187 Versuche mit der experimentellen Brennkammer statt. Es wurde jedoch sowohl mit GCH_4 als auch mit GH_2 getestet, 55 dieser Versuche wurden mit Methan als Brennstoff durchgeführt.

Da bei der Zündung ein hochenergetischer Laserpuls genutzt wird, muss dieser präzise auf einen Ort mit hoher Zündwahrscheinlichkeit gerichtet sein. Aufgrund dessen, dass im Folgenden die Flammenankerung und nicht die Zündung betrachtet wird, kommen daher alle Versuche unabhängig vom Zündort und deren Zündwahrscheinlichkeiten in Frage.

Eine Flammenankerung kann nur stattfinden, wenn sich ein Flammenkern gebildet hat und die Reaktion der Medien großflächig in der Brennkammer stattfindet. Daher werden ebenso Versuche herausgefiltert bei denen sich kein Flammenkern gebildet hat und sich auch keine Verbrennung etablieren konnte.

Des Weiteren ist es für die Strömungsgeschwindigkeitsberechnung der einzelnen Medien wichtig den durchschnittlichen Massenstrom zu kennen. Hierfür sind wie in Kapitel 1.2 erwähnt stromaufwärts des Injektorkopfs, vor den Ventilen Coriolissensoren zur Massenstromermittlung verbaut. Sie sind aufgrund ihres Messprinzips bei konstantem Massenstrom sehr präzise, liefern aber bei transienten Strömungsvorgängen verzögerte Messausgaben. Beim Anfahren und Abbrechen der Versuchsdurchführung finden genau solche Transienten statt und sorgen bei vorzeitigem Verlöschen der Flamme, wie in Abbildung 3.2 zu sehen, für eine ungenaue durchschnittliche Massenstromabschätzung. Die Massenstromsensoren sind so weit vom Injektor entfernt, dass der Massenstrom im Injektor mit einer zeitlichen Versetzung von etwa 200 ms ausgegeben wird. Verstärkt wird die zeitliche Messdifferenz zum Injektor durch das Messprogramm, welches Werte in einem Zeitraum von 100 ms mittelt, bevor es diese ausgibt. Bei einer Frequenz von 100 Hz enthalten Abbildungen über transiente Vorgänge deshalb hohen Messverzögerungen.

Solange die Ventile über eine Laufzeit von mindestens einer Sekunde geöffnet bleiben, kann der Massenstromsensor sehr genaue stationäre Messdaten liefern, welche wie schon in Kapitel 2.2.2 beschrieben, die Grundlage für die Berechnung der

Stoffgeschwindigkeiten bilden. Man kann in Abbildung 3.1 für Test B erkennen, dass die Sauerstoffwerte schwanken, bevor sich ab $t = +900 \text{ ms}$ der konstante Massenstrom einstellt. Berechnet man die Durchschnittswerte über diese Schwankung von $t = 0 \text{ ms}$ bis $t = +900 \text{ ms}$, erhält man Werte nahe an denen des stationären Massenstroms zwischen 900 ms und 2250 ms.

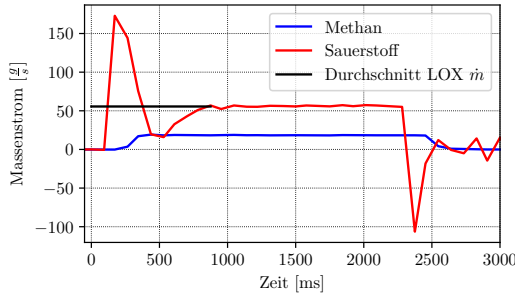


Bild 3.1.: Coriolissensordaten Test B

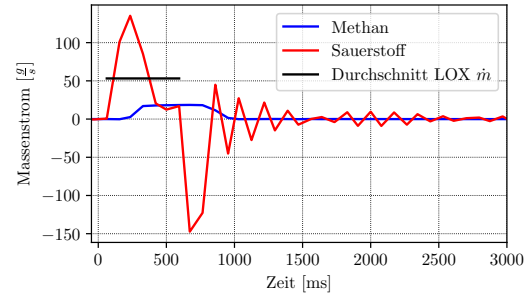


Bild 3.2.: Coriolissensordaten Test E

Daher wird in allen Versuchen, in denen sich durch vorzeitigen Abbruch des Versuchs und der Schließung der Ventile kein stationärer Massenstrom einstellen kann, eine Annäherung des Massenstroms durch Mittlung der Anfahrschwankung berechnet. Beispielsweise wie in Test E in Abbildung 3.2 zu sehen, über die Schwankung von $t = +50 \text{ ms}$ bis $t = +550 \text{ ms}$. Durch die bereits erwähnten Verzögerungen in den Messungen und den zeitlich unterschiedlichen Ventilschließungen kann Beginn und Ende der Schwankung über die weiteren Versuche hinweg unterschiedlich sein. Der Durchschnittswert aus dieser Schwingung ist in beiden Darstellungen 3.1 und 3.2 als schwarze Linie gekennzeichnet und ist in dem Bereich abgebildet, in dem der Durchschnittswert ermittelt wurde. In Test E ist ebenfalls der Effekt eines Wasserhammers zu sehen, der nach schlagartiger Schließung der Ventile zum Zeitpunkt $t = +550 \text{ ms}$ entsteht und für eine abklingende Schwingung des Massenstroms sorgt.

Bei sieben Versuchen verlösch die Flamme so schnell, dass es nicht einmal zu einer Schwingung des Sauerstoffmassenstroms kam und daher keine Berechnung möglich ist. Unter Berücksichtigung der Filterung bleiben demnach zwölf Testfälle übrig. Aufgrund der Lesbarkeit werden die Test-IDs, wie in nachfolgender Tabelle 3.1 ersichtlich, bezeichnet. Zusätzlich wird eine Übersicht der jeweiligen durchschnittlichen Massenströme gegeben. Der flüssige Sauerstoff variiert in den Tests zwischen $53,15 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ und $61,90 \frac{\text{g}}{\text{s}}$. Der Methanmassenstrom besitzt über die Versuche hinweg eine geringere Streuung mit Massenströmen von $17,54 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ bis $18,69 \frac{\text{g}}{\text{s}}$.

Tabelle 3.1.: Übersicht der ausgewerteten Testfälle

Test ID	Bezeichnung in dieser Arbeit	$LOX \dot{m} [\frac{g}{s}]$	$GCH_4 \dot{m} [\frac{g}{s}]$
rcslaser_20111209_09	Test A	53,44	18,05
rcslaser_20111212_03	Test B	56,16	18,40
rcslaser_20111214_09	Test C	61,90	18,26
rcslaser_20111214_11	Test D	58,89	18,40
rcslaser_20111216_08	Test E	53,15	18,21
rcslaser_20111219_09	Test F	61,09	17,54
rcslaser_20120111_10	Test G	55,55	18,01
rcslaser_20120111_12	Test H	59,47	18,31
rcslaser_20120113_05	Test I	55,17	18,43
rcslaser_20120113_10	Test J	59,97	18,69
rcslaser_20120113_12	Test K	56,16	18,24
rcslaser_20120120_04	Test L	59,17	18,61

3.2. Flammenankerung

Ein Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Ankerung bei den eben beschriebenen Versuchen. Für eine stabile Verbrennung ist es wichtig festzustellen, welcher Ankerungszustand bei der Verbrennung von Methan und Sauerstoff zugrunde liegt und welche Operationsparameter für die Ankerung vorteilhaft sind. Der Ablauf des Zündvorgangs und die anschließende Ankerung wird vorwiegend durch die Zündposition, der Zusammensetzung des Treibstoffs, der vorherrschenden Strömung innerhalb der Brennkammer sowie von der Injektorgeometrie beeinflusst [10].

Ein sehr guter Indikator für die Art der Ankerung ist der optische Zugang zur Brennkammer. Hierfür sind die OH^* -Chemielumineszenzaufnahmen sowie Schlieren-Videos von Vorteil. Durch die Verbrennung von Sauerstoff und Methan entstehen angeregte OH^* Radikale, die bei Abregung Licht im Bereich von $315 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ emittieren, die dann in den OH^* -Aufnahmen als helle Bildpunkte visualisiert werden [19]. Daher sind gerade diese Videos für die Analyse von Verbrennungsvorgängen nützlich. Auf der anderen Seite gibt es noch die Schlierenaufnahmen mit deren Hilfe die Stoffdichten visuell unterscheidbar werden, welche durch Kompressibilitätseffekte oder Temperaturänderungen unterschiedliche Dichtegradienten besitzen.

In der folgenden Bildreihe 3.3 lässt sich das, durch den 3 ns kurzen Laserpuls, entstehende Plasma sowie die Entwicklung des Flammenkerns und die anschließende Ausbreitung über die Rezirkulationszone hin zu einer makroskopischen Flamme, im beobachtbaren Bereich der Brennkammer erkennen [10]. Die Strömungsrichtung ist hier vom linken Bildrand zum rechten verlaufend.

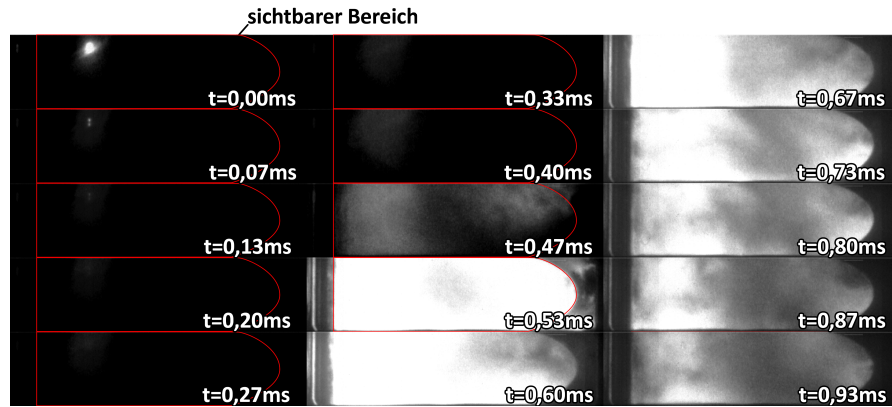


Bild 3.3.: OH*-Aufnahmeserie der Zündung Test A

Man sieht, dass das aufgeheizte Plasma des Lasers das Sauerstoff-Methan-Gemisch entzündet und ein Flammenkern entsteht. Vom Zündort aus breitet sich die Verbrennungszone über die Rezirkulationszone zwischen $t = 0,33 - 0,47 \text{ ms}$ weiter aus und sorgt so für Reaktionen innerhalb der gesamten Brennkammer. Nach erfolgreicher Ausbreitung und bei günstigen Strömungsbedingungen kommt es schließlich zur Ankerung der Flamme.

Neben dem optischen Zugang kann man die in den OH*-Aufnahmen die Verbrennungsintensität auch über die Drucksensoren erkennen. So lässt sich in Abbildung 3.4 sehen, dass eine vorliegende Verbrennung mit einem Druckanstieg innerhalb der Brennkammer gekoppelt ist.

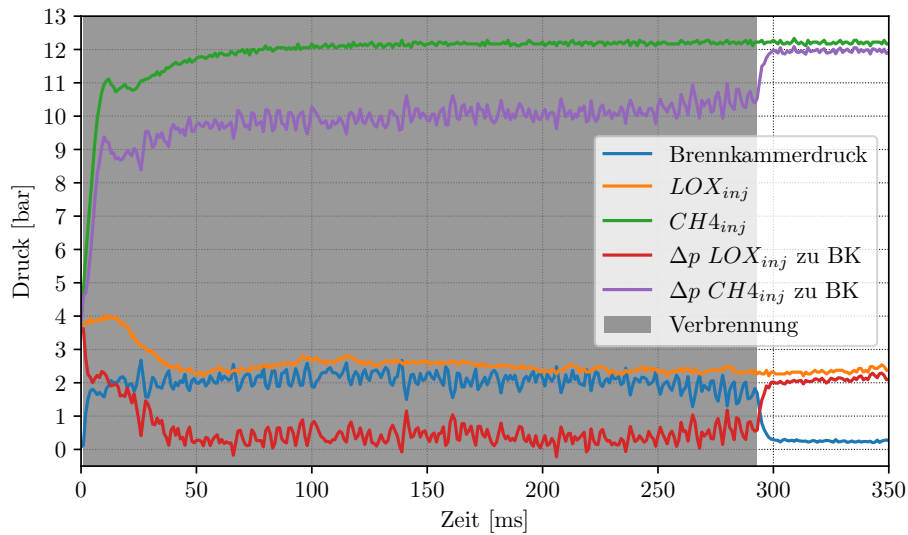


Bild 3.4.: Druckverlauf Test A

Die in Tabelle 3.1 genannten Versuche zeigen alle einen ähnlichen groben Ablauf der Abbildung 3.4, mit ein paar Unterschieden. So variieren Zeitpunkt der Sauerstoffeinspritzung, Einspritzdruck und Temperatur der Stoffe; Verlöschungszeitpunkt und damit die Länge der Verbrennung; Brennkammerdruck und Temperatur während Verbrennung sowie der Ventilschließungszeitpunkt.

Noch vor der Zündung wird bei Test A in etwa bei $t = -200 \text{ ms}$ Sauerstoff eingespritzt um den Injektorkopf herunter zu kühlen. Ab $t = 0 \text{ ms}$ wird zusätzlich Brennstoff eingespritzt, erkennbar am Druckanstieg im Injektorkopf. Zeitgleich wird der Laserimpuls ausgelöst und die Brennkammer zündet. Eindeutiger Indikator für eine stattfindende Verbrennung ist der Druckanstieg innerhalb der Brennkammer auf 2 bar. Die Reaktion läuft so lange bis die Strömungsbedingungen für eine Verlöschung der Flamme zum Zeitpunkt $t = +283 \text{ ms}$ sorgen. Der Brennkammerdruck fällt ab und die Medien werden so lange eingespritzt bis der Versuch mit der Schließung der Ventile zu Zeitpunkt $t = +600 \text{ ms}$ abgebrochen wird, erkennbar an fallenden Drücken der Medien im Injektorkopf. Da der Versuchsabbruch und die damit verbundene Schließung der Ventil für die Betrachtung der Flammenankerung und Verlöschung nicht relevant sind, werden die Zeitachsen aller Abbildungen auf etwa 50 ms nach jeweiligem Verbrennungsende gekürzt. Des Weiteren lässt sich erkennen, dass der Brennkammerdruck während Verbrennung, verglichen mit der Kaltgasströmung nach Verlöschung ab $t = +283 \text{ ms}$, größeren Schwankungen unterliegt. Die Druckschwankungen während der Verbrennung sorgen kurzzeitig für einen höheren Druck in der Brennkammer als der Druck innerhalb des Sauerstoffteils im Injektor. Damit ergibt sich eine Druckdifferenz für Sauerstoff in die Brennkammer hinein, die negative Werte beispielsweise wie zum Zeitpunkt $t = +136 \text{ ms}$ annimmt.

3.2.1. Parameterverhalten bei Ankerung

Mit der in Kapitel 2.2 beschriebenen Methode der Geschwindigkeits- und Dichteberechnung lassen sich die verschiedenen Parameter abhängig von der Zeit für die Tests aus Tabelle 3.1 darstellen. Im folgenden werden die Parameter bei Ankerung anhand eines Beispielsversuchs Test A beschrieben, welcher einen ähnlichen Versuchsverlauf zu Test B, C und L zeigt. Am Ende einer Parameterabhandlung wird eine Übersicht aller Versuche gegeben. Eine detaillierte Behandlung aller Tests würde über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen.

ROF

Wie zuvor erwähnt, reicht die zeitliche Auflösung der Massenstromsensordaten nur bedingt für eine Aussage über das Oxidator- zu Brennstoffmassenstromverhältnis in transienten Bereichen aus. Daher werden die zeitaufgelösten Massenströme $\dot{m}(t)$ mit dem Massenerhaltungssatz unter Nutzung der berechneten Strömungsgeschwindigkeiten $u(t)$, der zeitaufgelösten Dichte $\rho(t)$ und der Austrittsfläche aus dem Injektor A_{inj} für die jeweiligen Stoffe berechnet [13]:

$$\dot{m}(t) = \rho(t) \cdot A_{inj} \cdot u(t) \quad (3.1)$$

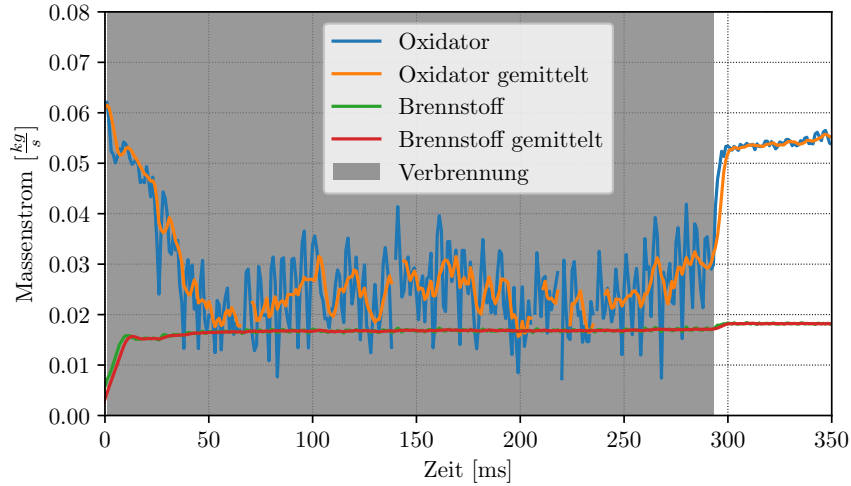


Bild 3.5.: Berechneter Massenfluss von Sauerstoff und Methan für Test A

Beim direkten Vergleich der Massenströme beider Medien in Abbildung 3.5 wird erkennbar, dass während der Verbrennung, beziehungsweise direkt nach der Ankerung der Massenstrom des Sauerstoffs stärker abfällt als der des Methans. Hervorgerufen wird dieser größere Abfall durch den höheren Druckverlust auf der Sauerstoffseite. Der Massenstrom des Sauerstoffs fällt bis $t = +50 \text{ ms}$ und bewegt sich dann unter größeren Schwankungen in einem Bereich zwischen $10 \frac{\text{g}}{\text{s}}$ und $40 \frac{\text{g}}{\text{s}}$. Der Massenstrom des Methans zeigt deutlich geringere Fluktuationen. Hier ist die Druckdifferenz von Injektor zur Brennkammer weit höher.

Es wird eine Mittlung zu jedem Zeitpunkt über die Werte der jeweils letzten 25 ms als orangefarbene Linie abgebildet und in weiteren Diagrammen fortgeführt. Die Lücken in den Daten stammen von der Dichteberechnung, indem fehlerhafte, negative Drucksensorwerte an die Python Coolprop Bibliothek übergeben werden, welche dann eine Fehlermeldung ausgibt.

Aus den abgebildeten Massenströmen lässt sich das Mischungsverhältnis ROF ableiten, zu sehen in Abbildung 3.6:

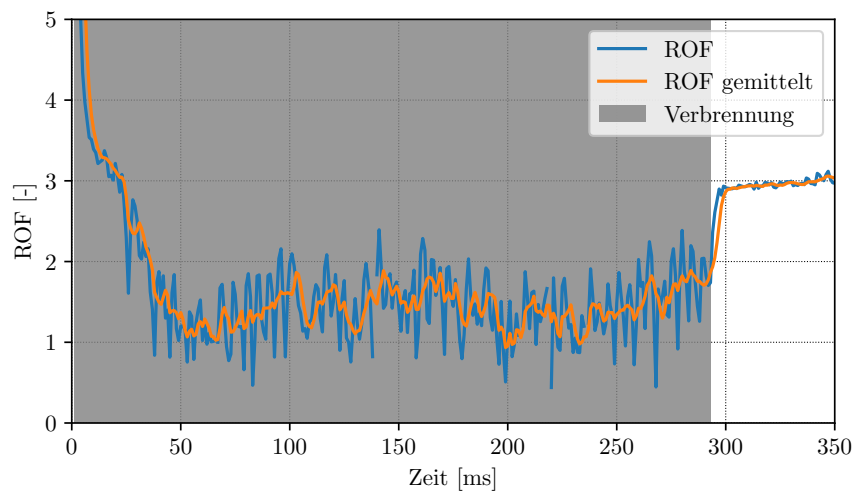


Bild 3.6.: ROF für Test A

Das Mischungsverhältnis fällt, wie erwartet, analog zum Sauerstoffmassenstrom bis $t = +50 \text{ ms}$ ab. Hiernach schwankt das Mischungsverhältnis, im Mittel der vorausgehenden 25 ms, zwischen 1 und 2. Nach der Verlöschung springt das ROF auf etwa 3. Test A hat mit einem durchschnittlichen Mischungsverhältnis von $ROF = 1,67$, im Vergleich zu allen anderen Versuchen, den niedrigsten Durchschnittswert während der Verbrennung.

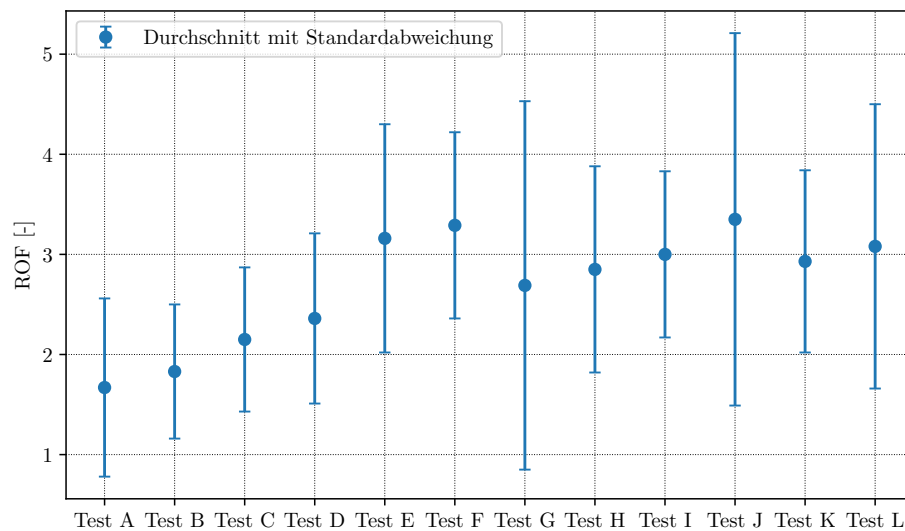


Bild 3.7.: Durchschnittliche Werte mit Standardabweichung während Verbrennung aller Tests

In Abbildung 3.7 sind die durchschnittlichen Mischungsverhältnisse während der Verbrennung mit der jeweiligen Standardabweichung zu sehen. Der Verbrennungszeitraum beginnt mit dem Anstieg und endet 5 ms vor Abfall des Brennkammerdrucks. Die durchschnittlichen Mischungsverhältnisse bewegen sich somit zwischen 1,67 und 3,35. Über alle Versuche hinweg ergibt sich damit im Mittel ein ROF von 2,7. Auffällig ist hier die hohe Standardabweichung von Test G und J. In Versuch G ist zu Beginn der Verbrennung das Mischungsverhältnis mit $ROF = 13,93$ sehr hoch, fällt aber innerhalb von 10 ms auf unter 4 ab. Der kurze Abfall zu Beginn zusammen mit einer kurzen Brenndauer von 105 ms sorgt für diese hohe Abweichung. In Test J treten zu Beginn deutlich höhere ROF Werte auf mit einem Maximalwert von $ROF = 21,27$ und mit einem Minimalwert von 1,12. Die hohen Werte sind nicht repräsentativ, da die Dichte von Methan innerhalb der ersten 5 ms langsam ansteigt. Der berechnete Massenstrom steigt demnach proportional an und sorgt so während dem Anfahren für sehr hohe Mischungsverhältnisse.

Geschwindigkeitsverhältnis

Um ein besseres Bild von den Strömungsgeschwindigkeiten der einzelnen Treibstoffe zu erhalten, sind in Abbildung 3.8 die jeweiligen Geschwindigkeiten im zeitlichen Verlauf abgebildet.

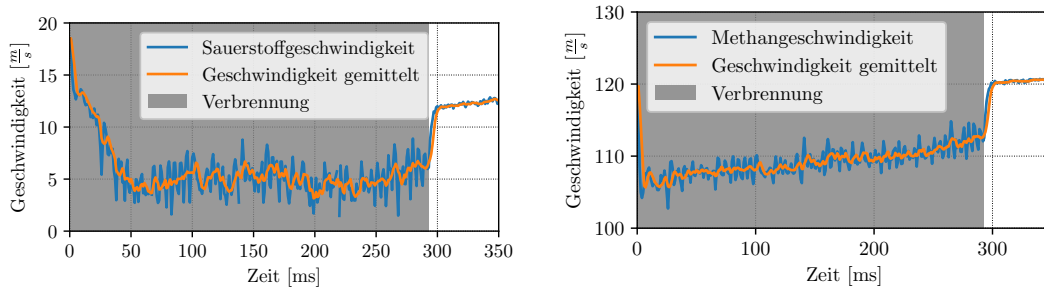


Bild 3.8.: Zeitlicher Verlauf der Stoffgeschwindigkeiten für Test A

Wie zuvor beim Mischungsverhältnis fällt die Sauerstoffgeschwindigkeit von $v_r = 15 \frac{m}{s}$ innerhalb von 50 ms auf $5 \frac{m}{s}$. Bleibt dann aber bis zum Ende der Verbrennung in einem Bereich von $5 \pm 2,5 \frac{m}{s}$. Im Vergleich dazu bewegt sich die Strömungsgeschwindigkeit von Methan zu Beginn der Verbrennung von $v_r = 106 \frac{m}{s}$ auf $v_r \approx 114 \frac{m}{s}$ zum Verlöschungszeitpunkt.

Abbildung 3.9 zeigt das daraus resultierende Geschwindigkeitsverhältnis $v_r = \frac{v_f}{v_o}$ über der Zeit mit einem grau hinterlegten Zeitraum in dem die Verbrennung stattfindet. Zum Zeitpunkt der Zündung liegt ein v_r von 8,5 vor. Dieses steigt dann durch den immer langsamer einströmenden Sauerstoff auf einen mittleren Wert von 25.

Da die Methangeschwindigkeit immer weiter ansteigt und ansonsten während der Verbrennung keine Verlaufsänderungen auftreten, prägt gerade die Sauerstoffgeschwindigkeit den qualitativen Verlauf des Geschwindigkeitsverhältnisses. Innerhalb der ersten 50 ms, im Vergleich zur restlichen Verbrennung, kann man sehen wie Schwankungen des Geschwindigkeitsverhältnisses im Laufe der Verbrennung zunehmen.

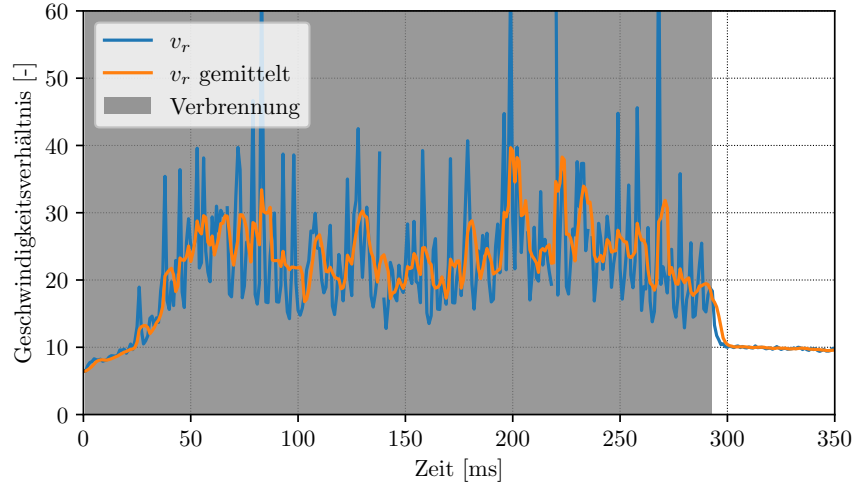


Bild 3.9.: Zeitlicher Verlauf des Geschwindigkeitsverhältnisses für Test A

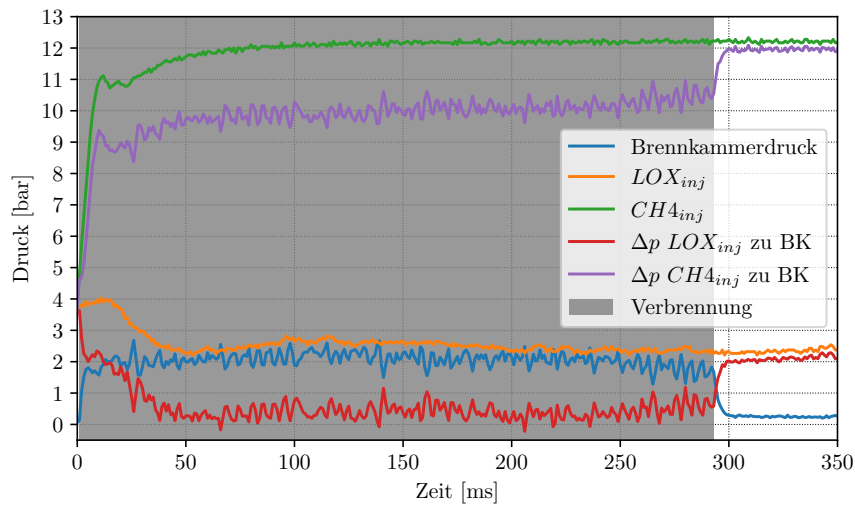


Bild 3.10.: Detaillierter Druckverlauf für Test A

Zurückzuführen ist dieses Verhalten auf den Sauerstoffeinspritzdruck im Injektorkopf siehe 3.10. Dieser ist zu Beginn der Zündung mit einer Druckspitze von bis zu 4 bar, verglichen mit dem Brennkammerdruck von 2 bar sehr hoch. Vermutlich ist der höhere Druck im Injektor zu Beginn der Einspritzung, durch die anfangs vorwiegend gasförmige Sauerstoffströmung zu erklären, welche bei fortschreitend höherem Brennkammerdruck einen größer werdenden Flüssigkeitsanteil besitzt. Weiterhin fällt der Sauerstoffdruck im Injektor ab. Der höhere Flüssigkeitsanteil und damit höhere Dichte des Sauerstoffs sorgen für ein Abbremsen des Sauerstoffmassenstroms. Je weiter die Verbrennung zeitlich fortschreitet desto geringer wird der LOX Injektordruck und damit auch der Druckverlust über den Injektor hinein in die Brennkammer. Nach 50ms ist der Druck im Injektor nur noch bei 3 bar und der Druckverlust in die Brennkammer so gering, dass Schwankungen des Brennkammerdrucks stärkere Auswirkungen auf die Einspritzgeschwindigkeit des Sauerstoffs haben.

Je höher das Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeiten ist, desto größer sind die Scherkräfte zwischen den Medien. Diese resultieren in einer besseren Durchmischung der Reaktanten und hat bis zu einem gewissen Grad einen positiven Effekt auf die Verbrennung. Bezogen auf Test A könnte daher ein moderates Ansteigen des v_r zur Ankerung der Flamme beigetragen haben. Hierfür sprechen ebenso der Vergleich der Geschwindigkeitsverhältnisse von Test G und F zu sehen in Abbildung 3.11. Ab einem Wert von $v_r = 14$ werden die Schwankungen stärker. Die beiden Tests zeigen auch jeweils einen Anstieg des Verhältnisses auf einen Wert, der möglicherweise die Verlöschung in beiden Fällen begünstigt hat. Siehe hierzu Kapitel 3.3.1.

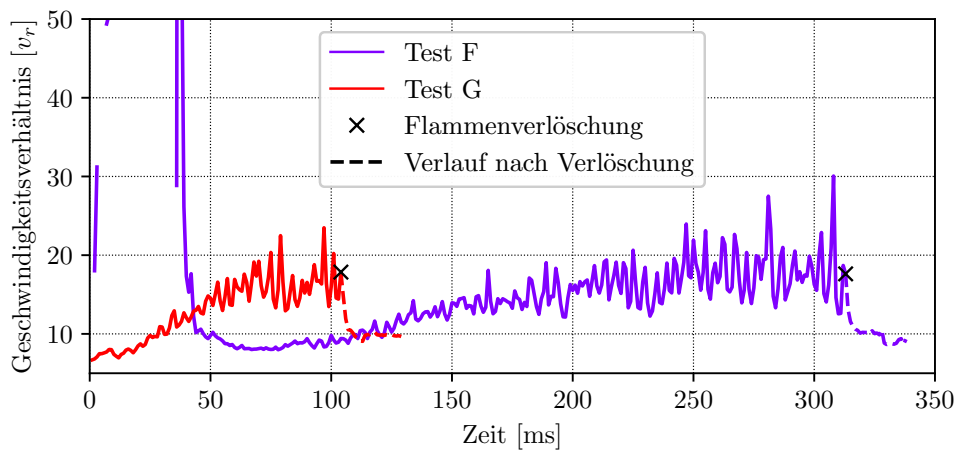


Bild 3.11.: Vergleich der Geschwindigkeitsverhältnisse Test G und Test F

In Abbildung 3.12 ist der Vergleich der durchschnittlichen Geschwindigkeitsverhältnisse während der Verbrennung mit der jeweiligen Standardabweichung zu sehen. Auffällig sind hier die hohen Durchschnittswerte und Standardabweichungen für Test A, B, C und D. Die durchschnittlichen Geschwindigkeitsverhältnisse bewegen sich zwischen 11,10 in Test J und 22,61 in Test A. Damit ergibt sich über alle Versuche ein Mittelwert von $v_r = 14,40$. Beim Vergleich zu Abbildung 3.7 wird erkennbar, dass bei niedrigem ROF höhere Geschwindigkeitsverhältnisse vorliegen.

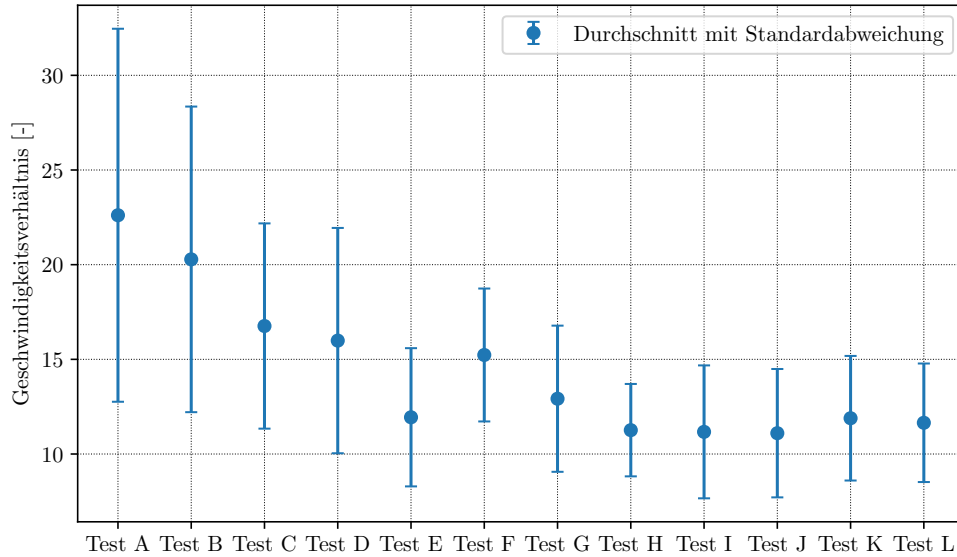


Bild 3.12.: Durchschnittliche Werte mit Standardabweichung während Verbrennung aller Tests

Impulsstromverhältnis

Die J-Zahl ist proportional zum Quadrat des Geschwindigkeitsverhältnisses. Somit sorgt das Dichteverhältnis von Oxidator zu Brennstoff $\frac{\rho_f}{\rho_o}$ für eine von v_r unterschiedliche Dynamik. Dennoch ist die Ähnlichkeit der beiden Parameter zueinander in Abbildung 3.13 im Vergleich zu 3.9 nicht zu übersehen. Die J-Zahl folgt demnach dem qualitativen Verlauf des Geschwindigkeitsverhältnisses, da sich das Dichteverhältnis über den Versuchsverlauf nur geringfügig ändert. Unterschiedlich ist jedoch die Ausprägung der Sprünge wie beispielsweise zum Zeitpunkt $t = +75 \text{ ms}$ mit Spitzen bei denen ein Maximalwert von $J = 66,12$ erreicht wird bevor die Werte wieder auf unter 5 fallen. Nach Verlöschen der Flamme stellt sich ein konstantes Impulsstromverhältnis mit minimalen Schwankungen ein. Die extremen Oszillationen während der Verbrennung sind daher bedingt durch die Schwankungen des Brennkammerdrucks.

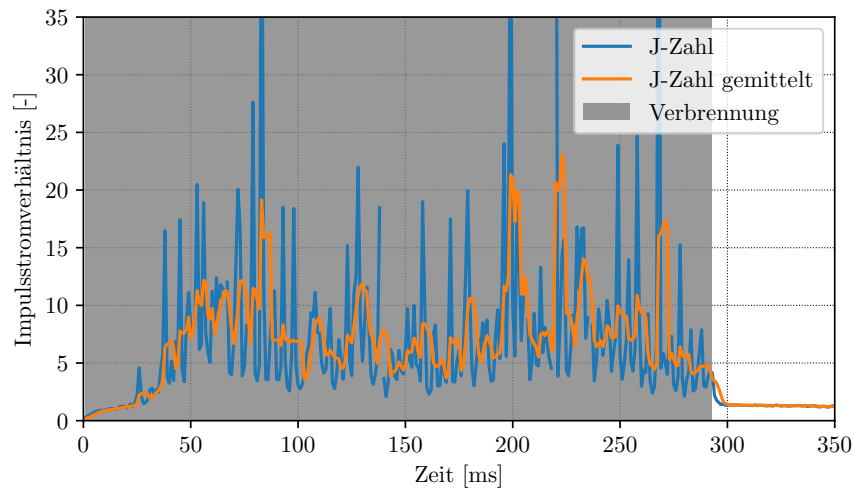


Bild 3.13.: J-Zahl über der Zeit für Test A

Auch beim Impulsstromverhältnis ist bekannt, dass hohe Werte eine gute Durchmischung und Zerstäubung des Sprays bedeuten. Yang et al. [10] zeigten, dass die Länge des intakten LOX Strömungskerns mit steigendem Impulsstromverhältnis abnimmt. Im rechten Diagramm der Abbildung 3.14 erkennt man den J-Zahlverlauf. In dem Verlauf sind zwei Punkte markiert, welche die dazu gehörigen OH* Momentaufnahmen in der linken Darstellung repräsentieren. Mit Fokus auf der Ankerung der Flamme hat sich in allen untersuchten Tests eine punktuelle Verbindung des Ankerpunkts mit dem J-Zahl Verlauf gezeigt. So sieht man beispielhaft für Test A in den OH*-Bildern die unterschiedlichen Ankerungsentfernungen zum Zeitpunkt $t = +63 \text{ ms}$ und unmittelbar vor Verlöschung der Flamme bei $t = +291 \text{ ms}$.

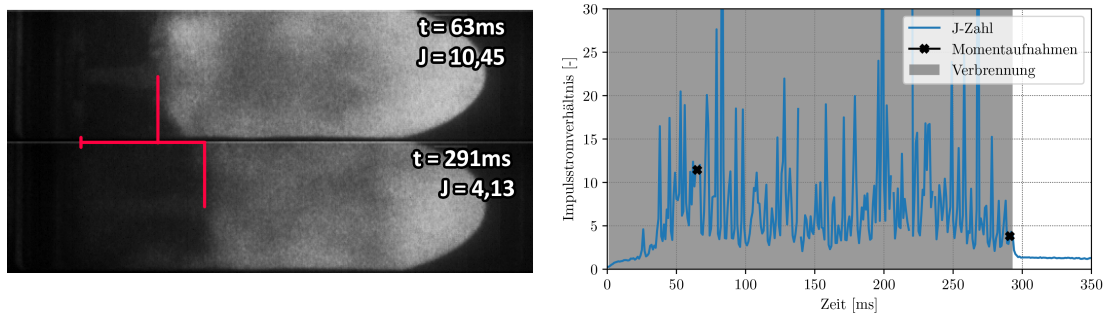


Bild 3.14.: Entfernungen des Ankerpunkts, links OH*, rechts J-Zahlverlauf Test A

Für eine versuchsübergreifende Darstellung werden in Abbildung 3.15 die durchschnittlichen Impulsstromverhältnisse sowie deren Standardabweichung während der Verbrennung bis 5 ms vor Verlöschung dargestellt. In dieser Darstellung wird sichtbar, dass höhere durchschnittliche Impulsstromverhältnisse eine insgesamt höhere Abweichung besitzen. Die durchschnittlichen Werte bewegen sich in einem Bereich von 1,6 in Test J bis hin zu 7,49 in Test A. Damit ergibt sich ein Mittelwert über alle Versuche von $J = 2,95$.

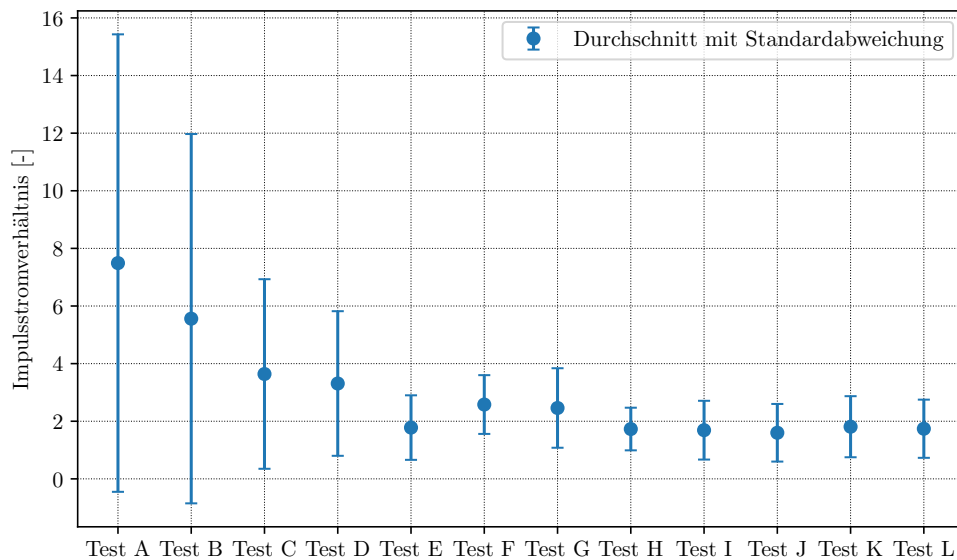


Bild 3.15.: Durchschnittliche J-Zahl Werte mit Standardabweichung während Verbrennung

Fazit

Vergleicht man den qualitativen Verlauf der Versuche so ist in Test A, B, C und L zu sehen, dass das Oxidator- zu Brennstoffmassenstromverhältnis zu Beginn der Verbrennung abfällt, bis sich eine stabile Verbrennung ergibt und das ROF im Mittel konstant bleibt. In Versuch D und J ist nach der Zündung sowohl ein Abfall, als auch 50 ms vor Verbrennungsende, ein Steigen des ROF erkennbar. Zuletzt fällt das ROF in Versuchen E, F, G, H, I und K bis zur Verlöschung der Flamme ab. Über alle Versuche hinweg ergibt sich im Durchschnitt ein $ROF = 2,7$. Die Parameterbereiche variieren jedoch sehr stark und besitzen, wie in Abbildung B.10 zu sehen, eine große Streuung. Die gruppierten Parameterverläufe können im Anhang für A, B, C und L in B.1, für D, J in B.4 und für die übrigen Versuche in B.7 betrachtet werden.

Besonders interessante Auswirkungen haben jedoch das Geschwindigkeitsverhältnis und das Impulsstromverhältnis auf den Ankerungspunkt der Flamme, welche in den OH*-Aufnahmen 3.14 deutlich zu sehen ist. Hier hat sich gezeigt, dass es eine direkte Verbindung von J-Zahl und dem in die Rechnung einfließenden Geschwindigkeitsverhältnis zur Entfernung des Ankerpunkts vom Injektorausstritt gibt. Je geringer die J-Zahl, desto weiter stromabwärts ankert die Flamme. Diese Aussage steht im Gegensatz zu den Auswertungen von Yang et al. [10], welche keine signifikante Korrelation zwischen der Distanz des abgehobenen Ankerpunktes und der dimensionslosen Kennzahlen Weber und J-Zahl gefunden haben. Auch bei dem Geschwindigkeitsverhältnis und der J-Zahl waren Tests mit ähnlichen Verläufen zu erkennen, so zeigten Test A B, C, und L wie in Abbildung B.2 für v_r und Abbildung B.3 für J bis auf unterschiedliche Niveaus ab einem Anstieg in den ersten 40 ms keine signifikanten Verlaufsänderungen. Das Geschwindigkeitsverhältnis befindet sich über alle Versuche im Mittel während der Verbrennung bei $v_r = 14,40$, das Impulsstromverhältnis bei $J = 2,95$. In Tabelle 3.1 sind die genauen Parameterbereiche sowie den Durchschnittswerten und deren Standardabweichungen, als auch der Werte zum Verlöschungszeitpunkt für alle ausgewerteten Tests aufgelistet.

3.3. Flammenverlöschung

Im Folgenden wird die Flammenverlöschung für die gefilterten Versuche genauer betrachtet. In allen zwölf Tests wurde eine vorzeitige Verlöschung der Flamme zu unterschiedlichen Zeitpunkten identifiziert. Man kann anhand der Druckdaten im Injektor ausschließen, dass der Versuchsabbruch und die damit verbundene Schließung der Ventile vor der Verlöschung statt fand und damit ursächlich sind. Daher kann man davon ausgehen, dass sich verändernde Strömungsverhältnisse innerhalb der Brennkammer die Flammenverlöschung bedingt haben. Gerade für einen zuverlässigen Betrieb ist es unerlässlich Betriebsbereiche und Bedingungen herauszufinden, bei denen eine Verlöschung der Flamme stattfindet, um somit zukünftig ein Verlöschen zu vermeiden. Hierzu wird der Versuchsverlauf kurz vor, als auch zum Zeitpunkt der Verlöschung untersucht. Es wird versucht aus den Parameterverläufen kritische Kennzahlbereiche zu identifizieren, die für eine Verlöschung sorgen könnten.

3.3.1. Parameterverhalten bei Verlöschung

Eine Verlöschung der Flamme kann, aufgrund der komplexen Zusammenarbeit strömungstechnischer Vorgänge, diverse Gründe haben. In diesem Kapitel werden deshalb die Verläufe während Verbrennung betrachtet und Änderung innerhalb eines kurzen Abstands vor Verlöschen der Flamme analysiert. Danach wird versucht mögliche Verlöschungsbedingungen zu identifizieren.

Es hat sich bei der Auswertung ergeben, dass eine Gruppierung von Versuchsreihen mit ähnlichen Parameterverläufen sinnvoll ist. In Kapitel 3.2.1 wurden 3 Gruppen identifiziert. Zum einen Test A, B, C und L mit Verläufen ohne besonderen Auffälligkeiten, zum anderen Test D und J mit einem Wechsel der Parameterverläufe während der Verbrennung sowie alle übrigen Tests E, F, G, H, I und K mit durchgängigem Anstieg oder Abfall der Parameter.

ROF

In Kapitel 3.2 wurde auf den Verlauf des ROF für Test A für die Flammenankering eingegangen. Nun wird der Zeitraum kurz vor Verlöschung betrachtet. In Bild 3.6 steigt das Verhältnis von etwa 1,5 bis auf 2 an bevor die Flamme verlöscht, und durch den stark fallenden Brennkammerdruck nach Verbrennung, auf einen Wert von $ROF \approx 3$ herauf springt. Vor der Verlöschung wurden jedoch auch, beispielsweise zum Zeitpunkt $t = 100 \text{ ms}$, Mischungsverhältnisse von über 2 erreicht, ohne dass die Flamme verlöscht. Daher kann der kurze Anstieg des ROF, vor Verlöschung der Flamme, nicht ursächlich für diese sein.

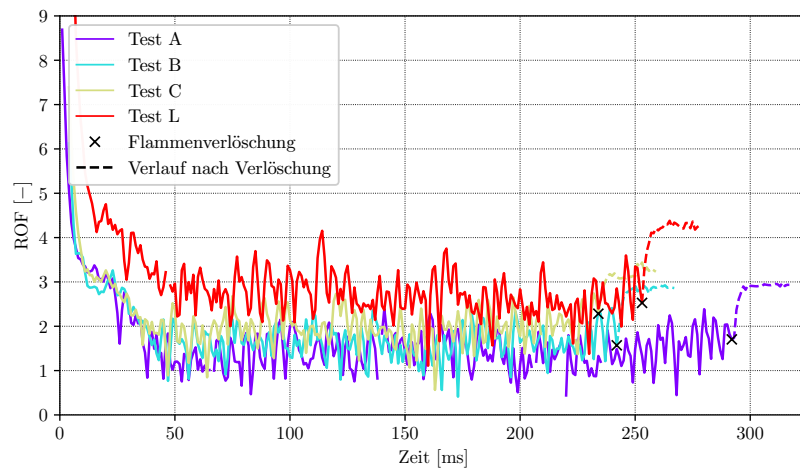


Bild 3.16.: ROF über der Zeit von Test K und Test L

Wie eben erwähnt ähnelt Test B, C und L dem Verlauf von Test A. Das Diagramm 3.16 zeigt die Versuche während der Verbrennung als durchgezogene Linie. Ab dem Zeitpunkt der Verlöschung werden jeweils weitere 25 ms als Strichpunktlinie dargestellt. Die Verlöschungszeitpunkte werden als schwarzes Kreuz gekennzeichnet und trennen damit den Übergang zwischen der Verbrennung und der Kaltgasströmung. Die dargestellten Versuche zeigten im Bezug auf die Verlöschung keine signifikanten Parameterverläufe. Die Mischungsverhältnisse zu den jeweiligen Verlöschungszeitpunkten befinden sich innerhalb der Extremwerte, die während der Verbrennung erreicht werden und führen daher zur Annahme, dass das ROF nicht die Ursache der Verlöschungen ist.

Bild 3.17 zeigt Test D und J mit einer deutlich anderen Entwicklung. Es findet im Gegensatz zu den vorher genannten Versuchen eine konstante Abnahme des ROF bis etwa $t = +250$ ms statt, welche dann bis zur Verlöschung der Flamme wieder ansteigt. Die Werte des ROF liegen zum Zeitpunkt der Verlöschung bei beiden Versuchen in einem Bereich, der während der Verbrennung bereits höhere und niedrigere Werte aufgezeigt hat, wobei die Flamme nicht verlosch. Daher kann man auch bei diesen Verläufen annehmen, dass die Änderung des Mischungsverhältnisses zu einer oxidatorreicheren Mischung nicht die Ursache für die Flammenverlöschung ist. Eine Änderung des ROF vor der Verlöschung, lässt darauf schließen, dass sich die Einstömgeschwindigkeiten oder Stoffdichten geändert haben. Im folgenden Kapitel wird daher das Geschwindigkeitsverhältnis genauer untersucht.

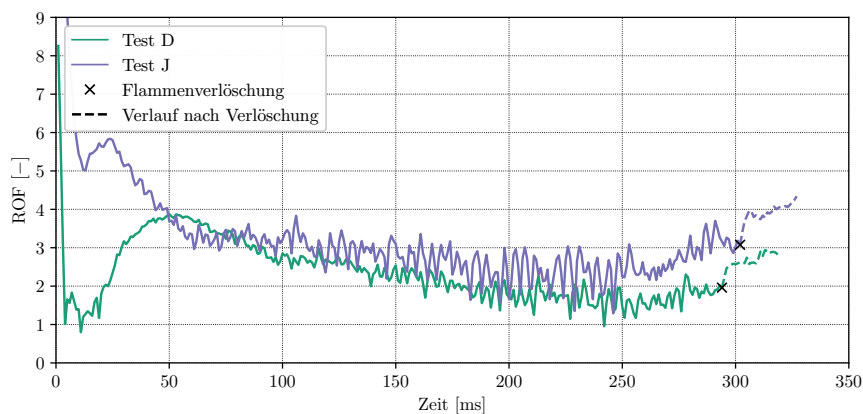


Bild 3.17.: ROF über der Zeit von Test D und Test J

Interessant sind die restlichen Versuche im Bezug auf den qualitativen Verlauf des Massenstromverhältnisses. Hier wird die Mischung während der Verbrennung durchgehend brennstoffreicher. In den restlichen Versuchen treten Werte von deutlich unter 2 bis hin zu 1 auf, weswegen man schlussfolgern kann, dass ebenso in diesen Versuchen eine Verlöschung, durch eine zu brennstoffreiche Mischung, unwahrscheinlich ist.

Um eine Übersicht über alle Versuche zu erhalten wird die Darstellung aus Kapitel 3.2.1 mit den Durchschnittswerten und der Standardabweichung mit den jeweiligen Werten zum exakten Verlöschungszeitpunkt erweitert. In Abbildung 3.18 kann man für Test A, B C und L sehen, dass die Verlöschungswerte sehr nah am Durchschnitt während der Verbrennung ist und deutlich innerhalb der Standardabweichung liegt. Damit lässt sich bestätigen, dass in den Versuchen der ROF Wert keine Verlöschung verursacht hat. Versuch D und J zeigt ein ähnliches Verhalten, weshalb sich auch hier eine Verlöschung durch ungeeignete Mischungsverhältnisse ausschließen lässt. Interessant sind die übrigen Tests. Hier ist der Parameterverlauf hin zu einer brennstoffreicheren Mischung erkennbar durch den Verlöschungswert, der sich

unterhalb der Standardabweichung befindet. Test G bildet hier die Ausnahme, wobei in diesem Test eine sehr hohe Standardabweichung durch einen extrem hohen ROF Wert zu Beginn der Verbrennung verursacht wird. Auch wenn es den Anschein macht, dass bei diesen Versuchen der Abfall des Mischungsverhältnisses die Verlöschung bedingt hat, spricht ein Mischungsverhältnis von etwa 2 nicht zwangsweise dafür. Die Versuchen zeigten ROF Minimalwerte, welche weit unter den Verlöschungswerten liegen. Die Minimalwerte bei diesen Versuchen liegen zwischen 0,83 in Test I und 1,51 in Test H, die Verlöschungswerte hingegen zwischen 1,69 von Test G und 2,35 bei Test F.

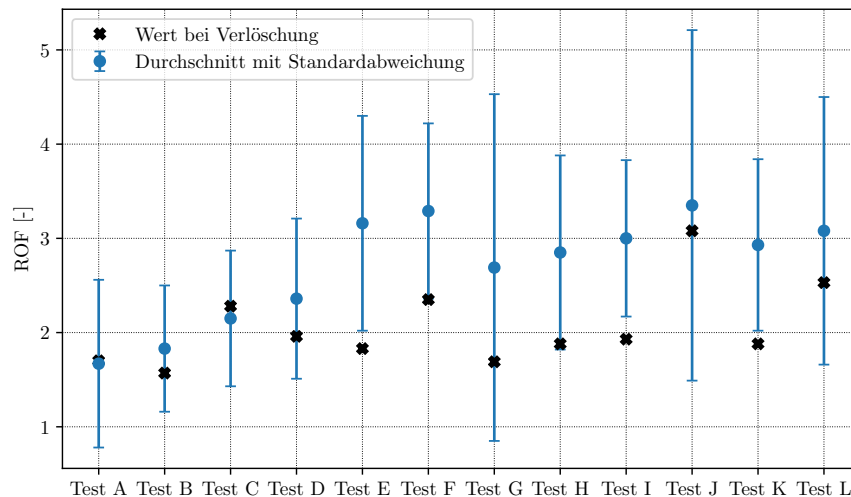


Bild 3.18.: Durchschnittswerte mit Standardabweichung und Verlöschungswerte aller Versuche

Folglich kann man zusammenfassend sagen, dass das Mischungsverhältnis in den betrachteten Versuchen nicht der ausschlaggebende Parameter für eine Flammenverlöschung ist.

Da die Massenströme über die Einströmgeschwindigkeiten, der Injektorgeometrie und der Stoffdichten berechnet wird, wäre es möglich, dass die Geschwindigkeiten oder eine zeitliche Änderung der Stoffzustandsgrößen die Verlöschung verursacht haben könnte.

Geschwindigkeitsverhältnis

Wie zuvor beim Mischungsverhältnis zeigen die Versuche A, B, C und L, auch für das Geschwindigkeitsverhältnis keine nennenswerten Verlaufsänderungen, sondern haben bis zur Verlöschung ein durchschnittliches $v_r = 14,4$. Siehe Abbildung B.2.

Test D und J haben schon beim ROF 50 ms vor Verlöschung Änderungen gezeigt, die man ebenso deutlich im Geschwindigkeitsverhältnis in Abbildung 3.19 sieht. Wirft man einen Blick auf das Ende des Verbrennungszeitraums, erkennt man hier einen Abfall der Verhältnisse.

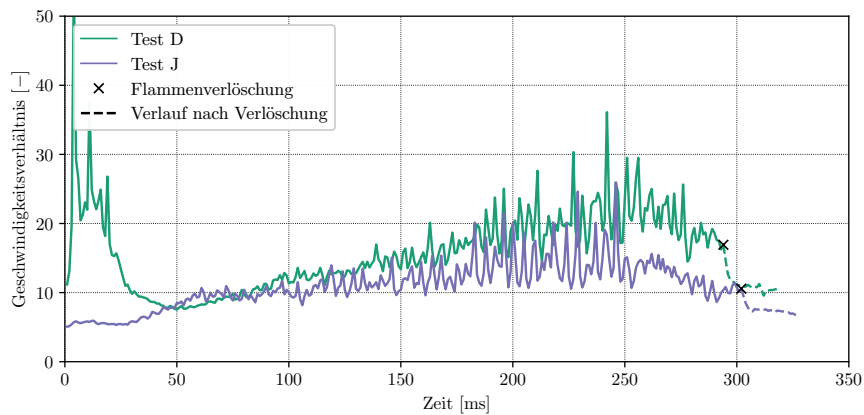


Bild 3.19.: v_r über der Zeit von Test D und Test J

Diese Änderung kann ungünstige Strömungsbedingungen hervorrufen. Ein minimales Geschwindigkeitsverhältnis ist wichtig für einen frühen Strahlzerfall sowie eine gute Zerstäubung und sorgt bei genügend hohen Werten für Scherkräfte, die eine gute Durchmischung der Medien innerhalb der Scherschicht bewirkt und damit eine bessere Zerstäubung gewährleistet. Zu geringe Geschwindigkeitsverhältnisse erschweren somit die Durchmischung und den Strahlzerfall [10]. Demnach könnte ein Abfall der Verhältnisse eine Flammenverlöschung bewirken.

Zu beachten ist hier, dass minimal benötigte Geschwindigkeitsverhältnisse vom Mischungsverhältnis abhängen. Das minimal nötige Geschwindigkeitsverhältnis sinkt mit zunehmendem Mischungsverhältnis [17]. Schaut man sich für Versuch D und J das v_r und ROF zum Zeitpunkt der Verlöschung an, erkennt man sinkende v_r bei jeweils steigendem ROF. Damit lässt sich nicht eindeutig sagen ob der Abfall des Geschwindigkeitsverhältnis bei diesen beiden Versuchen der Grund für die Verlöschung war. Maßgeblich beeinflusst wird das v_r in den Versuchen durch die Sauerstoffgeschwindigkeit. Diese steigt in Versuch D und J vor Ende der Verbrennung wieder an. Jedoch sind auch die Werte für das Geschwindigkeitsverhältnis in beiden Versuchen zum Zeitpunkt der Verlöschung höher als zu Anfang der Verbrennung. Eine mögliche Erklärung wäre, dass die lokale Strömungsgeschwindigkeit, durch den Anstieg der Sauerstoffgeschwindigkeit höher als die Flammengeschwindigkeit unter den gegebenen Bedingungen ist. Für eine genauere Analyse wäre es nötig Verbrennungsgeschwindigkeiten für die vorliegenden Mischungsverhältnisse Zustandsgrößen der Strömung herauszufinden.

In Testfall G und F, in Abbildung 3.20 sieht man repräsentativ für Test E, F, G, H, I und K einen konstanten Anstieg des Geschwindigkeitsverhältnisses. Gerade in Testfall G steigen die Werte innerhalb der ersten 100 ms an und enden bei einem $v_r = 17,85$. Test F zeigt einen sehr ähnlichen Verlauf, nur über einen längeren Zeitraum von 300 ms aber mit weitaus größeren Schwankungen gegen Ende der Verbrennung bei einem Verlöschungswert von $v_r = 17,63$. Auch die anderen Tests zeigen einen konstanten

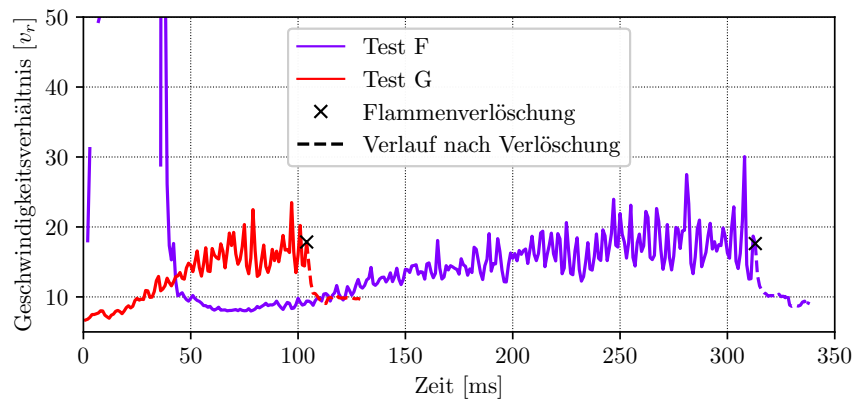


Bild 3.20.: Vergleich der Geschwindigkeitsverhältnisse Test G und Test F

Anstieg des Geschwindigkeitsverhältnisses und haben zum Zeitpunkt der Verlöschung durchschnittlich $v_r = 16,82$. Wie in Abbildung 3.21 zu sehen, sind die Werte zum Zeitpunkt der Verlöschung außerhalb der Standardabweichung. Man könnte annehmen, dass ein Geschwindigkeitsverhältnis von über etwa 17 in diesen Versuchen zur Flammenverlöschung geführt hat. Ein Gegenargument dazu wäre das Geschwindigkeitsverhältnis der Versuche A, B, C, und L, welche bei der Verlöschung im Mittel einen Wert von $v_r = 17,27$ besitzen und vor allem Test A und B Durchschnittswerte während der Verbrennung von über 20 haben.

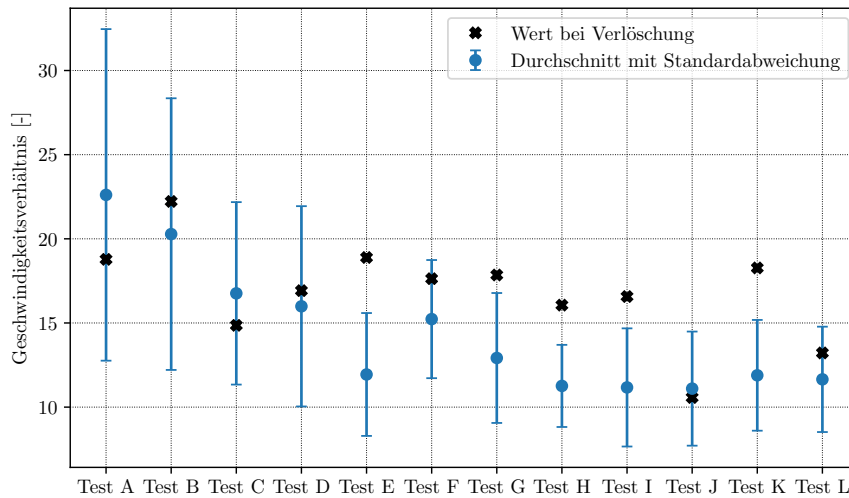


Bild 3.21.: Durchschnittswerte mit Standardabweichung und Verlöschungswerte aller Versuche

Daher kann man schlussfolgern, dass der Anstieg des Geschwindigkeitsverhältnisses in den ausgewerteten Versuchen nicht zur Flammenverlöschung führte. Die Parameterbereiche, mit erreichten Minimal- und Maximalwerten stützen diese Aussage, da in Diagramm B.11 zu sehen ist, dass für die Versuche deutlich höhere Geschwindigkeitsverhältnisse erreicht werden, wenn auch nur über sehr kurze Zeiträume.

Impulsstromverhältnis

In Kapitel 3.2.1 wurde eine mögliche Abhängigkeit der J-Zahl und des Ankerpunktes gezeigt, daher werden im Folgenden neben dem J-Zahlverlauf für Test A 3.22 auch die OH*-Aufnahmen für die Analyse der Verlöschung hinzugezogen.

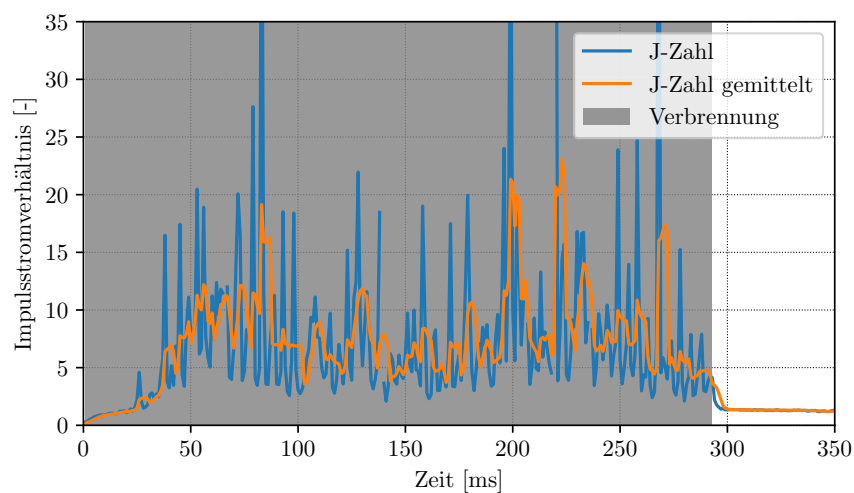


Bild 3.22.: J-Zahl über der Zeit für Test A

Auffällig ist hier, dass in Test A das Impulsstromverhältnis kurz vor Verlöschung immer weiter abnimmt. Sieht man sich die OH*-Aufnahmen 3.14 aus Kapitel 3.2.1 an, erkennt man eine Verlagerung des Ankerungspunktes in Richtung der Düse.

Zusätzlich zu dieser Verschiebung kommt es zu Druckschwankungen. Zu sehen sind diese im Druckverlauf der Brennkammersensoren durch hohe Druckspitzen, die teilweise höher sind als der Sauerstoffdruck im Injektorkopf. Man kann in OH*-Aufnahmen in Abbildung 3.23 feststellen, dass die Reaktion der Medien stromaufwärts bis an die Injektorkopfplatte fortschreitet. Über die darauffolgenden 2-3 Millisekunden nimmt die Reaktion der Stoffe ab, was auf eine geringer werdende Reaktionsintensität hinweist. Gegen Ende der OH*-Aufnahmen erkennt man eine stabilisierende Reaktionszone. Dem Druckverlauf nach zu urteilen, sorgen diese Druckschwankungen für kurzzeitige Unterbrechungen des Sauerstoffmassenstroms. Nach Überschreitung des Brennkammerdrucks über den Sauerstoffinjektordruck,

reagiert das Methan mit den geringeren Mengen an Sauerstoff bis dieser nahezu verbraucht ist. Der Brennkammerdruck fällt ab und erlaubt die Einspritzung von weiterem Sauerstoff.

Möglicherweise sind der Abtrieb des Flammenankerpunktes, sowie die eben beschriebenen Druckschwankungen, verantwortlich für die Flammenverlöschung in Test A.

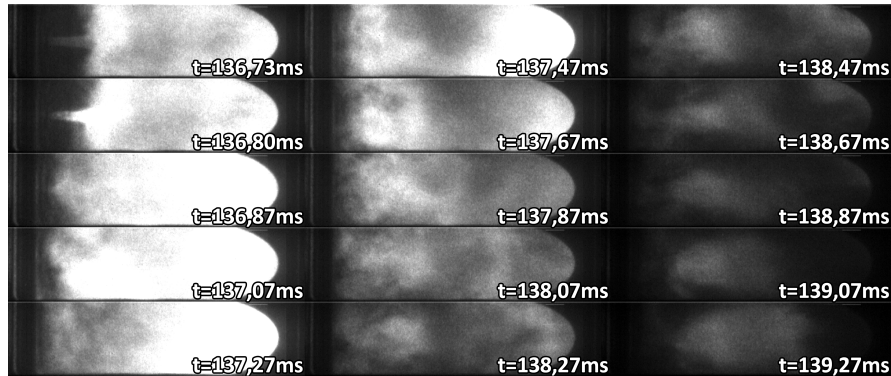


Bild 3.23.: OH*-Serie für unregelmäßige Verbrennung Test A

Ein Abfall des Impulsstromverhältnisses kurz vor der Verlöschung ist nicht nur in Versuch A zu beobachten. So sind in Test D und J, in denen das Geschwindigkeitsverhältnis bis zum Ende der Verbrennung abfällt, ebenso fallende Impulsstromverhältnisse festzustellen. Niedrige J-Zahlen bedeuten einen längeren intakten, flüssigen Sauerstoffstrahl [10]. Somit wäre es denkbar, dass die Flamme so weit abgehoben ist, dass kleine Änderungen der Strömungsdynamik, wie in Abbildung 3.23, eine Verlöschung der Flamme bewirkt haben. In Abbildung 3.24 sieht man für diese Tests jedoch keinen eindeutigen Verlöschungsgrund. Auch die Minimal- und Maximalwerte des Impulsstromverhältnisses, zu sehen in B.12, bei diesen Versuchen liefern keine eindeutigen Aussagen über ein zu niedriges Impulsstromverhältnis.

In Test E, F, G, H, I und K wurde im Gegensatz zu den restlichen Versuchen ein durchgängiger Anstieg des Impulsstromverhältnisses beobachtet. So steigt in diesen Tests das Verhältnis so lange an, bis die Flamme verlöscht. In Abbildung 3.24 lässt sich, wie zuvor beim Geschwindigkeitsverhältnis, Verlöschungswerte außerhalb der Standardabweichung feststellen. Der durchschnittliche Verlöschungswert bei diesen Versuchen ist für das Impulsstromverhältnis bei $J = 3,59$. Schaut man sich die Verläufe des Impulsstromverhältnis im Detail in Abbildung B.9 an, so kann man sehen, dass die Höchstwerte von den Brennkammerdruckspitzen stammen und kein Versuch über einen längeren Zeitraum ein Impulsstromverhältnis von über 4 hat. Daher wäre diese Verlöschungsgrenze durchaus denkbar. Jedoch haben die Tests A, B, C und D gezeigt, dass während der Verbrennung auch deutlich höhere Impulsstromverhältnisse erreicht werden können. Test D hat beispielsweise ein ansteigendes Impulsstromverhältnis bis auf 6, und somit deutlich über dem gedachten Grenzwert von 4.

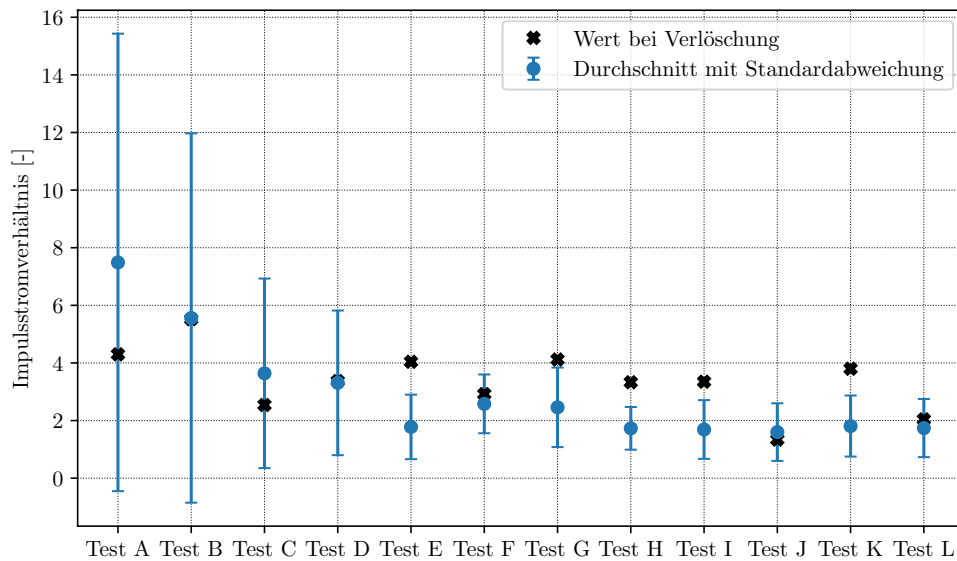


Bild 3.24.: Durchschnittswerte mit Standardabweichung und Verlöschungswerte aller Versuche

Fazit

Die Betrachtung des Mischungsverhältnisses lieferte keine eindeutige Aussage für den Verlöschungsgrund. Die Varianz der Parameterverläufe zeigt drei mögliche Trends, mit jeweils anderen Strömungsbedingungen vor Verlöschung. So blieb in Test A, B, C, und L das Mischungsverhältnis im Mittel bis zur Verlöschung konstant und innerhalb der Standardabweichungen der Durchschnittswerte während der Verbrennung. In Test A, D und J wurden 50 ms vor Verlöschung ein Anstieg des ROF beobachtet und in Test E, F, G, H, I und K wurde im Mittel ein gleichmäßiger Abfall gezeigt. Auch wenn diese Trends vermuten lassen, dass der Anstieg oder Abfall die Verlöschung der Flamme bewirkt hat, befinden sich die Mischungsverhältnisse aller Versuche zum Verlöschungszeitpunkt deutlich innerhalb der, während der Verbrennung erreichten, Minimal- und Maximalwerte. Die genauen Werte sind in Tabelle A im Anhang zusammengetragen.

Beim Geschwindigkeits- und Impulsstromverhältnis ließen sich, ähnlich dem Mischungsverhältnis, ebenfalls diese Trends erkennen. Die Werte der Versuche A, B, C, und L zeigten sowohl beim v_r , als auch bei der J-Zahl keine nennenswerten Parameterverläufe. In Test D und J wurden für beide Verhältnisse fallende Werte festgestellt, welche jedoch zum Verlöschungszeitpunkt höher sind, als zu Beginn der Verbrennung und dem Anstieg der Werte. Somit kann man auch bei Test D und J keinen eindeutigen Verlöschungsgrund durch Abfall des v_r oder Impulsstromverhältnisses feststellen.

Test E, F, G, H, I und K liefern bis zur Verlöschung steigende Geschwindigkeits- und Impulsstromverhältnisse. Jedoch wurden während der Verbrennung zeitweise höhere Maximalwerte festgestellt und auch bei anderen Test waren Verhältnisse deutlich über den Verlöschungswerten erkennbar. Somit kann sowohl mit dem Geschwindigkeitsverhältnis, als auch mit dem Impulsstromverhältnis keine Betriebsgrenze beobachtet werden, ab der eine Verlöschung in den ausgewerteten Versuchen eindeutig verursacht wird.

4. Zusammenfassung

Das Hauptziel dieser Arbeit war es, kritische Parameter für die Flammenankerung und die Flammenverlöschung für die Treibstoffkombination von flüssigem Sauerstoff und gasförmigem Methan zu bestimmen. Des Weiteren sollten anhand der Parameter Betriebsgrenzen identifiziert werden, in denen eine stabile, ununterbrochene Verbrennung gewährleistet ist. Dafür wurden Testfälle ausgewertet, die 2011 im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zur lasergestützten Zündung eines RCS Triebwerks unter Vakuumbedingungen am Teststand M3.1 des DLR Institut für Raumfahrtantriebe stattgefunden haben. Für die Auswertung der Versuche wurde eine Berechnungsmethode genutzt, welche mithilfe der durchschnittlichen Massenstromdaten, der Temperatur und des Drucks im Injektorkopf sowie der Druckdifferenz zwischen Injektorkopf und Brennkammer, die Strömungsgeschwindigkeiten des Sauerstoffs und des Methans liefert. Zusätzlich wurde die Dichte des LOX bei vorhandener Zweiphasenströmung berechnet. Hiermit gelang es detaillierte Daten für ROF , den Geschwindigkeitsverhältnissen und den Impulsstromverhältnissen zu bestimmen. Anhand der Parameter wurden die Verläufe kurz nach Zündung für die Flammenankerung betrachtet und unmittelbar vor der Flammenverlöschung analysiert.

Es wurde beobachtet, dass der Anstieg des Geschwindigkeitsverhältnisses geringeren Schwankungen unterliegt als in den durchschnittlich konstanten Bereichen während der Verbrennung. Des Weiteren zeigt das Impulsstromverhältnis ähnliche Verläufe wie das Geschwindigkeitsverhältnis, da sich das Dichteverhältnis innerhalb des Zeitraums der Verbrennung nur geringfügig ändert. Es ließ sich beobachten, dass hohe Impulsstromverhältnisse eine Ankerung der Flamme näher am Injektor zeigten. Über alle Tests hinweg konnte ein durchschnittliches Massenstromverhältnis von $ROF = 2,7$, ein Geschwindigkeitsverhältnis von $v_r = 14,4$ und einem Impulsstromverhältnis von $J = 2,95$ berechnet werden.

Bei der Verlöschung hat sich gezeigt, dass das Parameterverhalten unmittelbar vor Ausblasen drei charakteristische Verläufe annahm. So ergaben sich in Test A, B, C und L, im Bezug auf die ausgewerteten Kennzahlen unmittelbar vor Verlöschung, keine signifikanten Änderungen, womit sich keine Rückschlüsse auf Verlöschungsursachen ergaben.

Test D und J änderten während der Verbrennung die Parameterverläufe, durch eine Änderung der Sauerstoffgeschwindigkeit von einem Abfall bis 50ms vor Verbrennungsende zu einem Anstieg der Geschwindigkeit. Die bei der Verlöschung erreichten Parameter liegen alle nahe an den durchschnittlich erreichten Werten während der Verbrennung, weswegen man auch bei diesen Versuchen keine eindeutige Aussage über den Verlöschungsgrund und den Parametergrenzen machen kann.

Die restlichen Tests E, F, G, H, I und K zeigen zwar einen eindeutigen Trend hin zu möglichen Parametergrenzen, die eine Verlöschung bedingt haben könnten. Jedoch zeigte der Vergleich zu anderen Versuchen, dass es versuchsübergreifend keine solche Parametergrenze gibt. Zusätzlich traten in den ausgewerteten Versuchen Druckschwankungen auf, die innerhalb von 2-3 Millisekunden für hohe Parameterspitzen sorgten.

Da keine eindeutigen Parameterverläufe für eine Flammenverlöschung identifiziert werden konnten, lassen sich keine kritischen Betriebsbereiche festlegen. Über die ausgewerteten Durchschnittswerte kann jedoch ein Bereich eingegrenzt werden, in dem ein Betrieb möglich ist.

Alle Testreihen in den ausgewerteten Kampagnentests, im Rahmen der lasergestützten Zündung, zeigten Schockstrukturen am Injektoraustritt der Methaneinspritzung. Die vorliegende Arbeit liefert Rückschlüsse auf die Verbrennungsdynamik durch Betrachtung der Zustandsgrößen innerhalb des Injektors mit Druckdaten in der Brennkammer. Somit wäre eine tiefer gehende Analyse der vorhandenen Strömungseigenschaften am Ankerpunkt der Flamme unter Berücksichtigung der Entfernung zum Injektor interessant. Möglich wäre auch eine iterative Berechnungsmethode für den Massenstrom zu wählen um ungenaue Massenstromwerte ausschließen zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] Messerschmid, E. und Fasoulas, S. *Raumfahrtsysteme. Eine Einführung mit Übungen und Lösungen*. Springer Vieweg, 2017.
- [2] Mayer, W. O. H. Coaxial atomization of a round liquid jet in a high speed gas stream: A phenomenological study. *Experiments in Fluids*, Vol. 16, No. 6, S. 401–410, 1994.
- [3] Mayer, W. O. H., Schik, A. H. A., Vielle, B., Chauveau, C., Gokalp, I., Talley, D. G. und Woodward, R. D. Atomization and Breakup of Cryogenic Propellants Under High-Pressure Subcritical and Supercritical Conditions. *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 14, No. 5, S. 835–842, 1998.
- [4] Villiermaux, E. Mixing and Spray Formation in Coaxial Jets. *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 14, No. 5, S. 807–817, 1998.
- [5] Smith, J. J., Schneider, G., Suslov, D., Oswald, M. und Haidn, O. Steady-state high pressure LOx/H₂ rocket engine combustion. *Aerospace Science and Technology*, Vol. 11, No. 1, S. 39–47, 2007.
- [6] Manfretti, C. und Kroupa, G. Laser ignition of a cryogenic thruster using a miniaturised nd:yag laser. *Optics express*, Vol. 21 Suppl 6, S. A1126–39, 2013.
- [7] Jakob, H. *Auswertung von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von Einspritz- und Zündungsvorgängen von kryogenen Treibstoffen in Raketenbrennkammern*. Masterthesis, Technische Universität Darmstadt, 2015.
- [8] Iannetti, A., Girard, N., Ravier, N., Edeline, E. und Tchou-Kien, D. PROMETHEUS, a low cost LOX/CH₄ engine prototype. In *53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [9] Burkhardt, H., Sippel, M., Herbertz, A. und Klevansnksi, J. Comparative Study of Kerosene and Methane Propellant Engines for Reusable Liquid Booster Stages. *4th International Conference on Launcher Technology "Space Launcher Liquid Propulsion"*, 2002.
- [10] Yang, B., Cuoco, F. und Oswald, M. Atomization and Flames in LOX/H₂- and LOx/CH₄- Spray Combustion. *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 23, No. 4, S. 763–771, 2007.
- [11] Martin, J., Hardi, J. S., Suslov, D., Oswald, M. und Armbruster, W. Experimental Investigation of Self-Excited Combustion Instabilities in a LOX/LNG Rocket Combustor. *AIAA 2020-0423, AIAA Scitech 2020 Forum*, 2020.
- [12] Manfretti, C. Laser Ignition of an Experimental Cryogenic Reaction and Control Thruster: Ignition Energies. *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 30, No. 4, S. 952–961, 2014.

- [13] Weigand, B., Köhler, J. und von Wolfersdorf, J. *Thermodynamik kompakt*. Springer Vieweg, 2016.
- [14] Von Braun, W. *Konstruktive, theoretische und experimentelle Beiträge zu dem Problem der Flüssigkeitsrakete*. Raketentechnik und Raumforschung. Deutsche Ges. für Raketentechnik und Raumfahrt e.V, 1959.
- [15] Lux, J. *Flammenstabilisierung in einer Hochdruck-Raketenbrennkammer bei koaxialer Injektion von LOX-Methan*. RWTH Aachen, Dissertation, 2008. Berichte aus der Luft- und Raumfahrttechnik. 2008.
- [16] Yatsuyanagi, N., Gomi, H., Kumakawa, A., Sakamoto, H. und Tamura, H. Experimental Study of Liquid Oxygen/Methane Rocket Combustor. In Proceedings of the 15th International Symposium on Space and Science, Seiten 401–406, 1986.
- [17] Jensen, R. J., Dodson, H. C. und Claflin, S. E. Lox/hydrocarbon combustion instability investigation, 1989.
- [18] Fiock, E. F. Measurement of Burning Velocity. In Ladenburg, R. W., Lewis, B., Pease R. N. und Taylor, H. S., Herausgeber, *Physical measurements in gas dynamics and combustion*. Band IX, Nummer 9 der Reihe High speed aerodynamics and jet propulsion, Seiten 409–438. Princeton university press, 1954.
- [19] Haber, L. C., Vandsburger, U., Saunders, W. R. und Khanna, V. K. An Examination of the Relationship Between Chemiluminescent Light Emissions and Heat Release Rate Under Non-Adiabatic Conditions. In ASME Turbo Expo 2000: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2014.

A. Tabelle der Parameter

<i>Test</i>	<i>Parameter</i>	Wert bei Verlöschung	Durchschnitt während Verbrennung	Standard- abweichung	Minimum	Maximum
<i>TestA</i>	<i>ROF</i>	1.7	1.67	0.89	0.44	8.69
<i>TestA</i>	<i>v_r</i>	18.78	22.61	9.85	6.44	74.42
<i>TestA</i>	<i>J</i>	4.3	7.49	7.94	0.28	66.12
<i>TestB</i>	<i>ROF</i>	1.57	1.83	0.67	0.41	6.12
<i>TestB</i>	<i>v_r</i>	22.22	20.28	8.07	7.74	84.22
<i>TestB</i>	<i>J</i>	5.52	5.56	6.41	0.56	80.02
<i>TestC</i>	<i>ROF</i>	2.27	2.15	0.72	0.56	7.39
<i>TestC</i>	<i>v_r</i>	14.86	16.76	5.42	7.09	60.3
<i>TestC</i>	<i>J</i>	2.54	3.64	3.29	0.37	41.75
<i>TestD</i>	<i>ROF</i>	1.96	2.36	0.85	0.8	8.26
<i>TestD</i>	<i>v_r</i>	16.92	15.99	5.95	7.53	55.12
<i>TestD</i>	<i>J</i>	3.37	3.31	2.50	0.53	21.25
<i>TestE</i>	<i>ROF</i>	1.83	3.16	1.13	1.33	11.69
<i>TestE</i>	<i>v_r</i>	18.89	11.94	3.65	7.12	25.78
<i>TestE</i>	<i>J</i>	4.04	1.78	1.12	0.26	7.58
<i>TestF</i>	<i>ROF</i>	2.35	3.29	0.93	1.42	5.03
<i>TestF</i>	<i>v_r</i>	17.63	15.23	3.51	8.8	30.05
<i>TestF</i>	<i>J</i>	2.92	2.58	1.02	1.36	8.27
<i>TestG</i>	<i>ROF</i>	1.69	2.69	1.84	1.29	13.93
<i>TestG</i>	<i>v_r</i>	17.85	12.92	3.86	6.7	23.48
<i>TestG</i>	<i>J</i>	4.12	2.46	1.38	0.19	7.12
<i>TestH</i>	<i>ROF</i>	1.88	2.85	1.03	1.51	11.22
<i>TestH</i>	<i>v_r</i>	16.05	11.26	2.44	5.2	20.48
<i>TestH</i>	<i>J</i>	3.33	1.73	0.74	0.18	5.29
<i>TestI</i>	<i>ROF</i>	1.93	3	0.83	1.18	8.15
<i>TestI</i>	<i>v_r</i>	16.57	11.17	3.51	6.1	24.66
<i>TestI</i>	<i>J</i>	3.35	1.69	1.02	0.48	8.07
<i>TestJ</i>	<i>ROF</i>	3.08	3.35	1.86	1.29	21.27
<i>TestJ</i>	<i>v_r</i>	10.57	11.1	3.39	5.08	25.94
<i>TestJ</i>	<i>J</i>	1.34	1.6	1	0.09	7.84
<i>TestK</i>	<i>ROF</i>	1.88	2.93	0.91	1.29	10.7
<i>TestK</i>	<i>v_r</i>	18.27	11.89	3.29	4.72	26.72
<i>TestK</i>	<i>J</i>	3.8	1.81	1.06	0.17	8.08
<i>TestL</i>	<i>ROF</i>	2.52	3.08	1.42	1.11	15.93
<i>TestL</i>	<i>v_r</i>	13.22	11.65	3.13	4.7	30.09
<i>TestL</i>	<i>J</i>	2.04	1.74	1.01	0.12	10.59

B. Diagramme

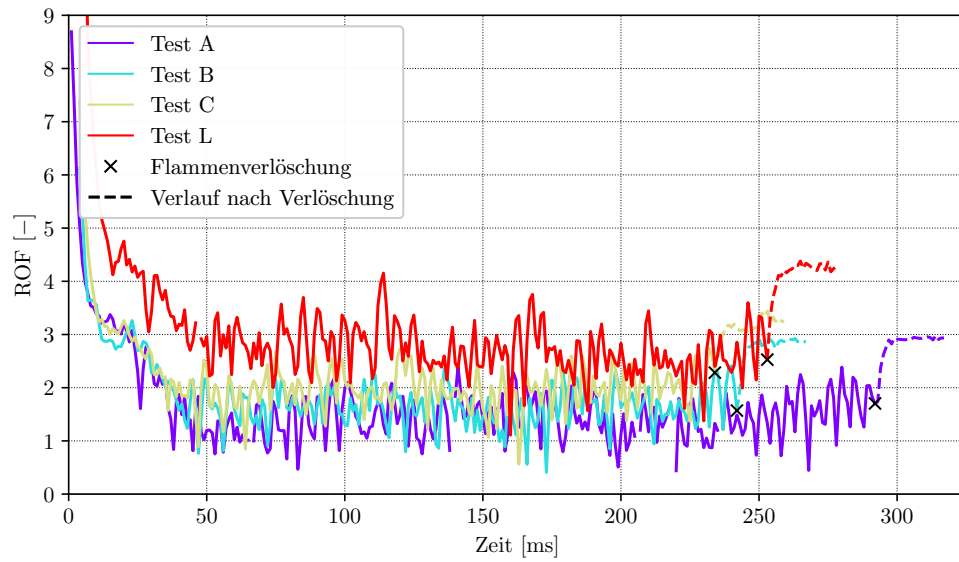


Bild B.1.: Test A, B C und L mit ähnlichen ROF Verlauf

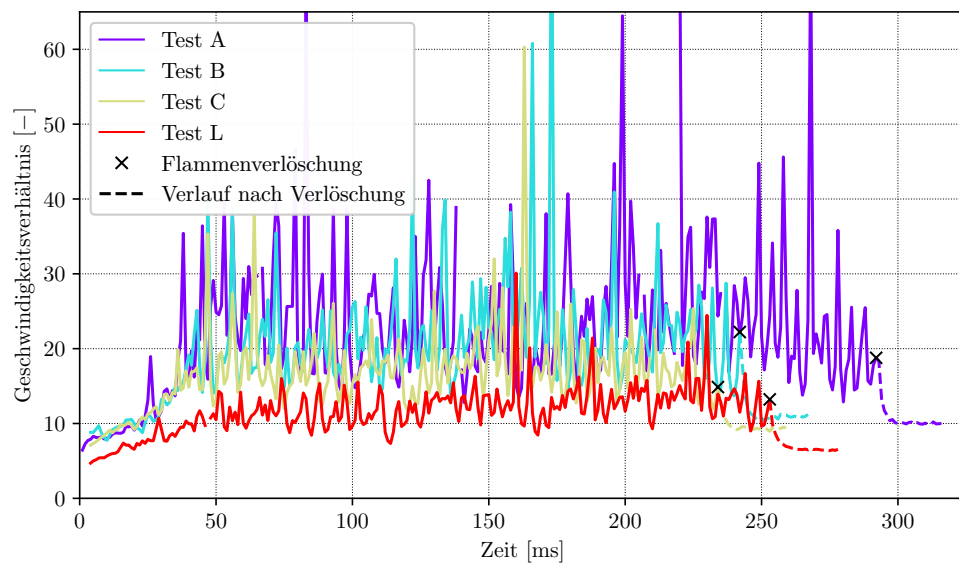


Bild B.2.: Test A, B C und L mit ähnlichen v_r Verlauf

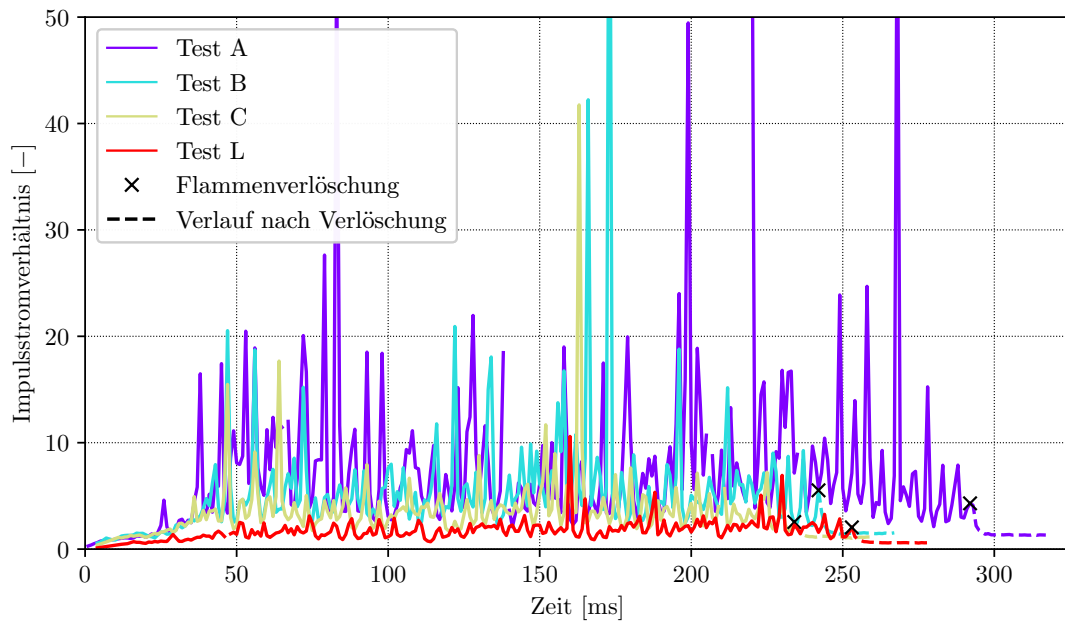


Bild B.3.: Test A, B C und L mit ähnlichen J-Zahlverlauf

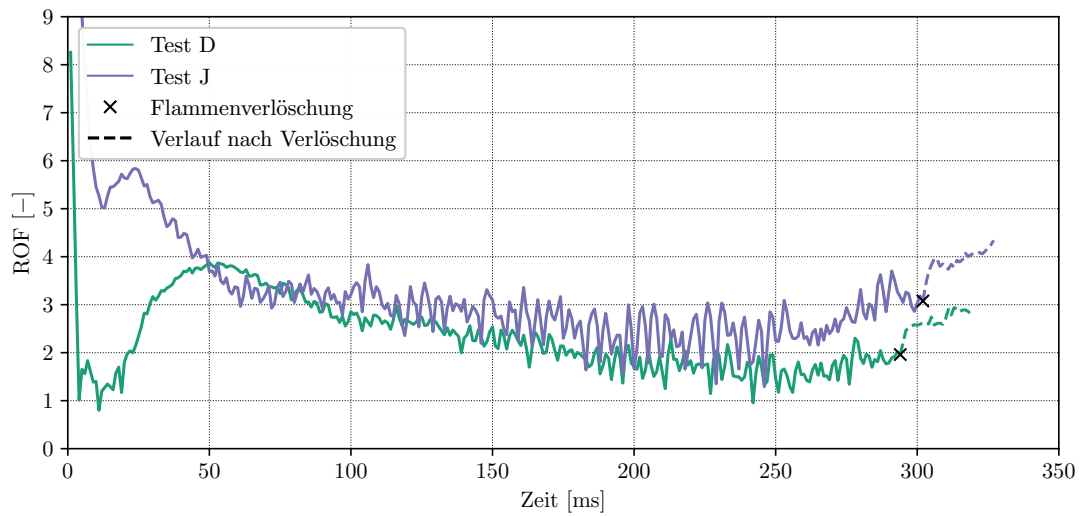


Bild B.4.: Test D und J mit ähnlichen ROF Verlauf

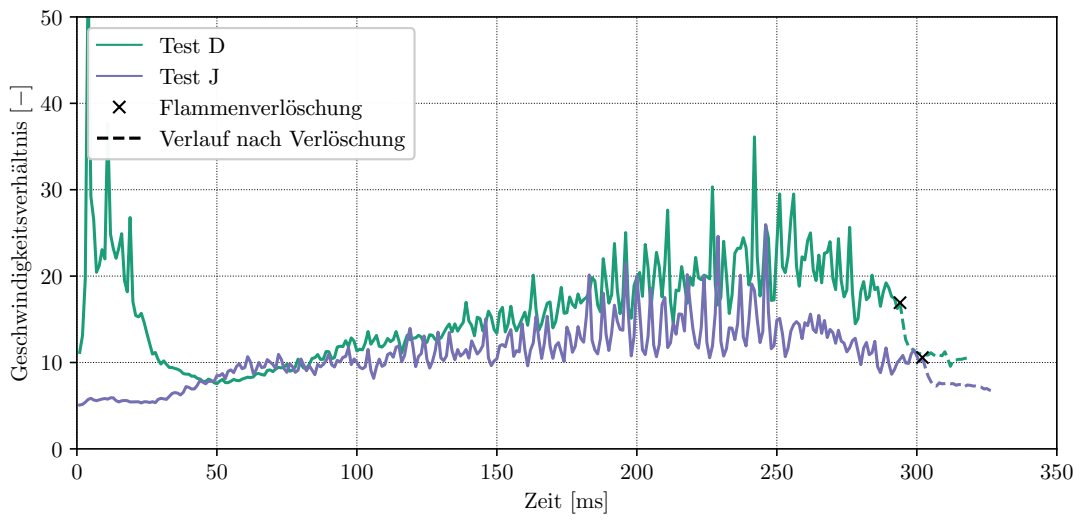


Bild B.5.: Test D und J mit ähnlichen v_r Verlauf

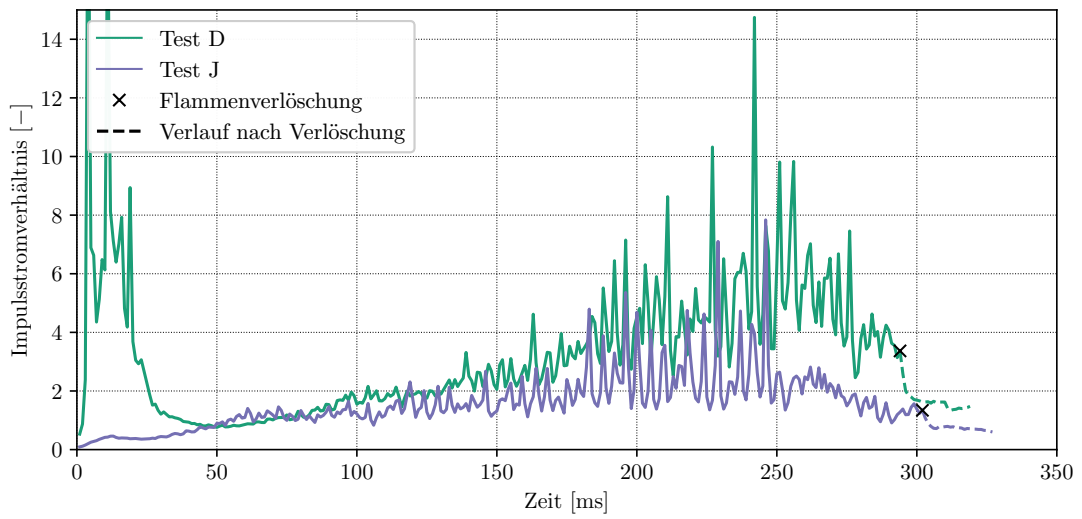


Bild B.6.: Test D und J mit ähnlichen J-Zahlverlauf

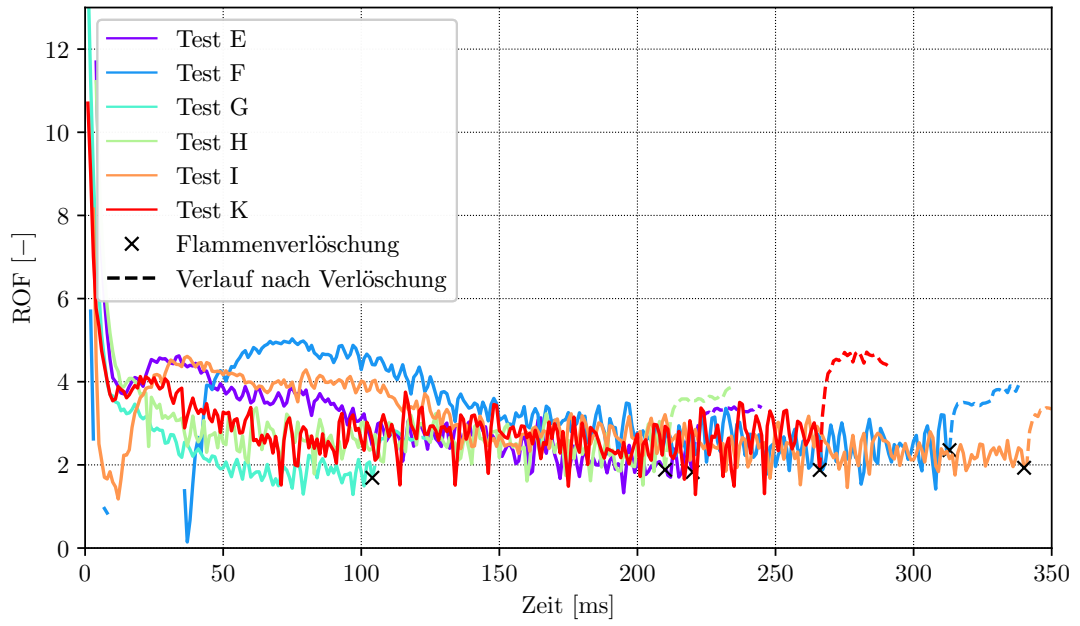


Bild B.7.: Test E, F, G, H, I und K mit ähnlichen ROF Verlauf

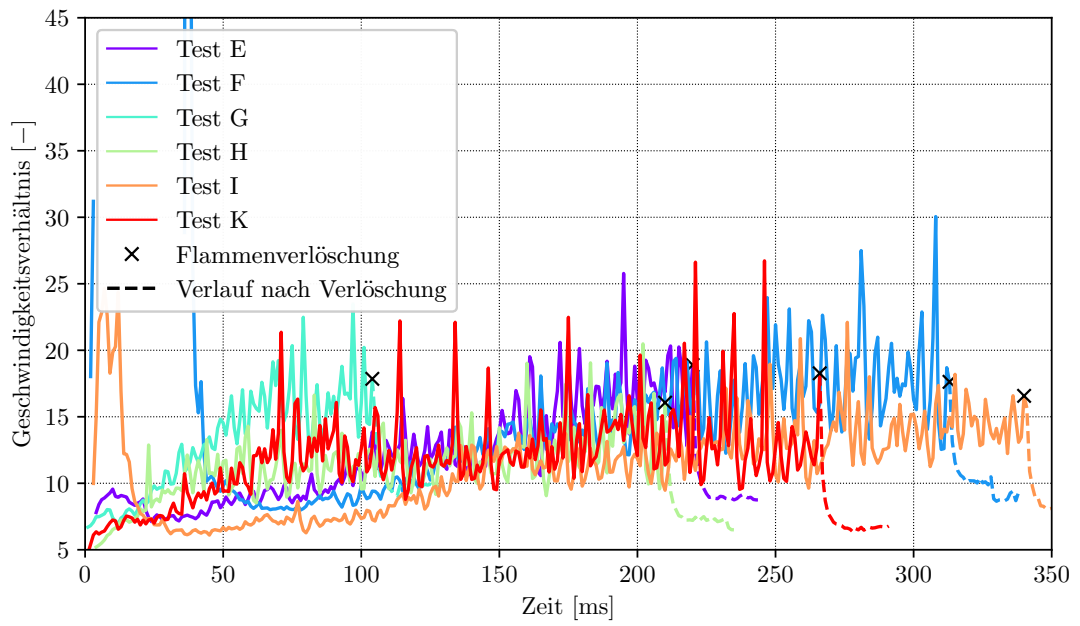


Bild B.8.: Test E, F, G, H, I und K mit ähnlichen v_r Verlauf

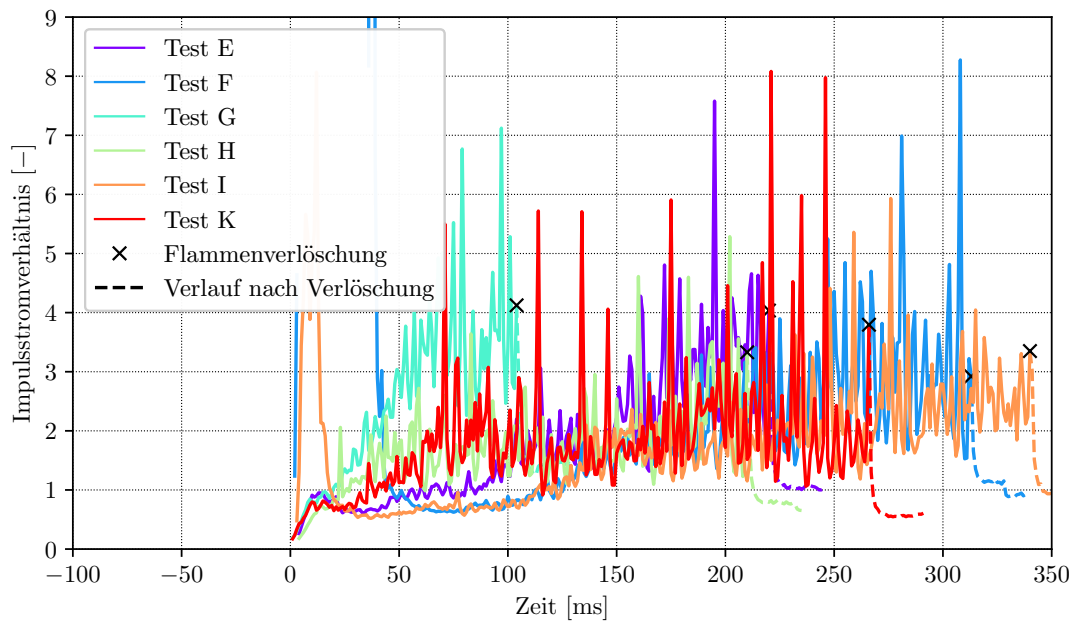


Bild B.9.: Test E, F, G, H, I und K mit ähnlichen J-Zahlverlauf

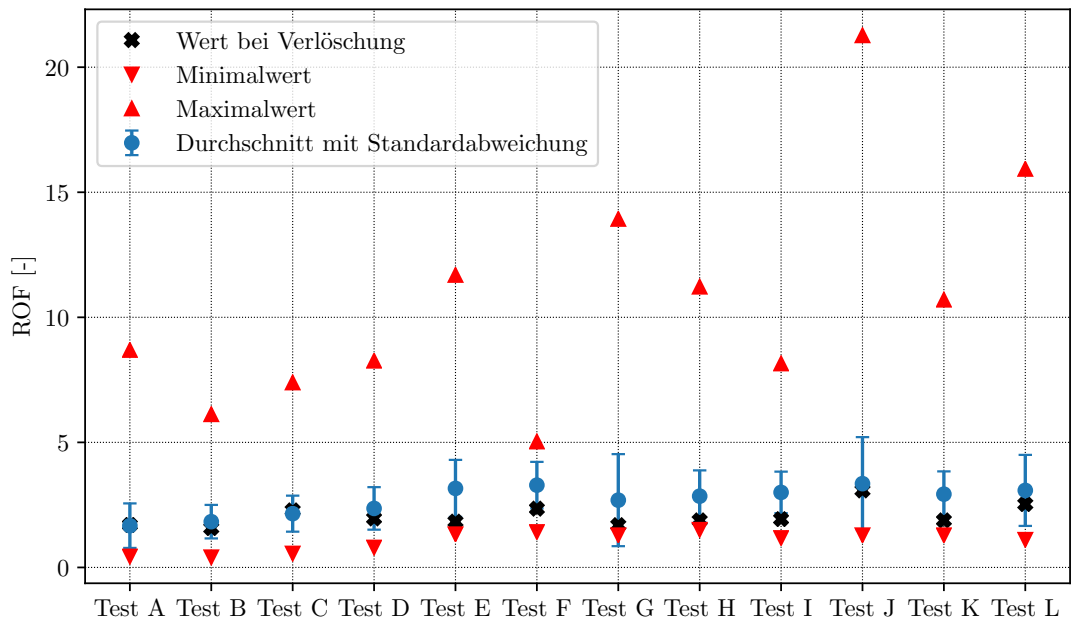


Bild B.10.: Wertebereiche, Durchschnittswerte mit Standardabweichung und Verlöschungswert aller Tests

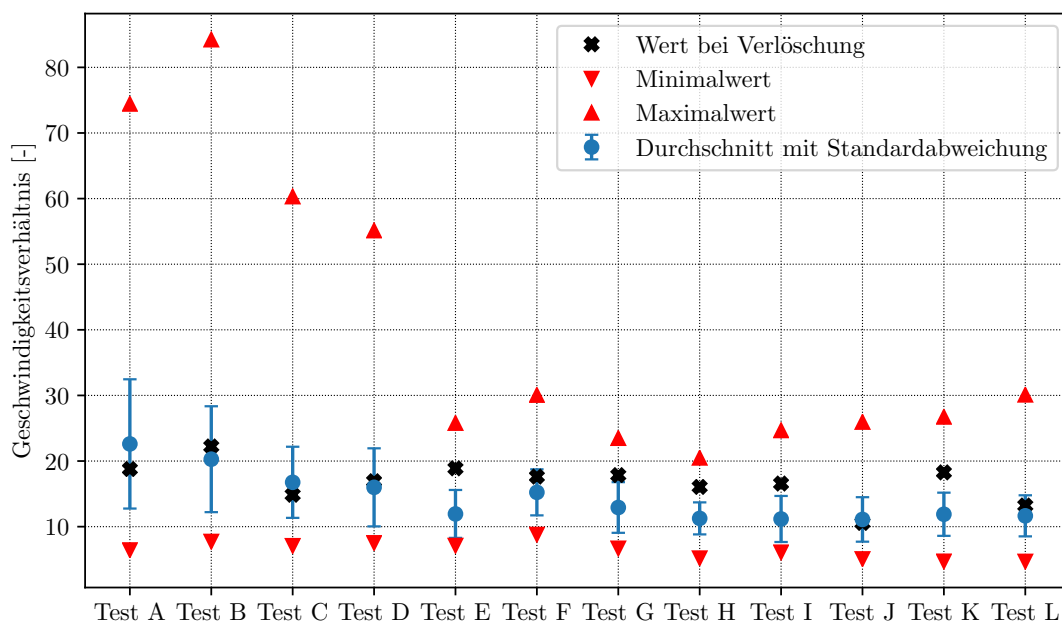


Bild B.11.: Wertebereiche, Durchschnittswerte mit Standardabweichung und Verlöschungswert aller Tests

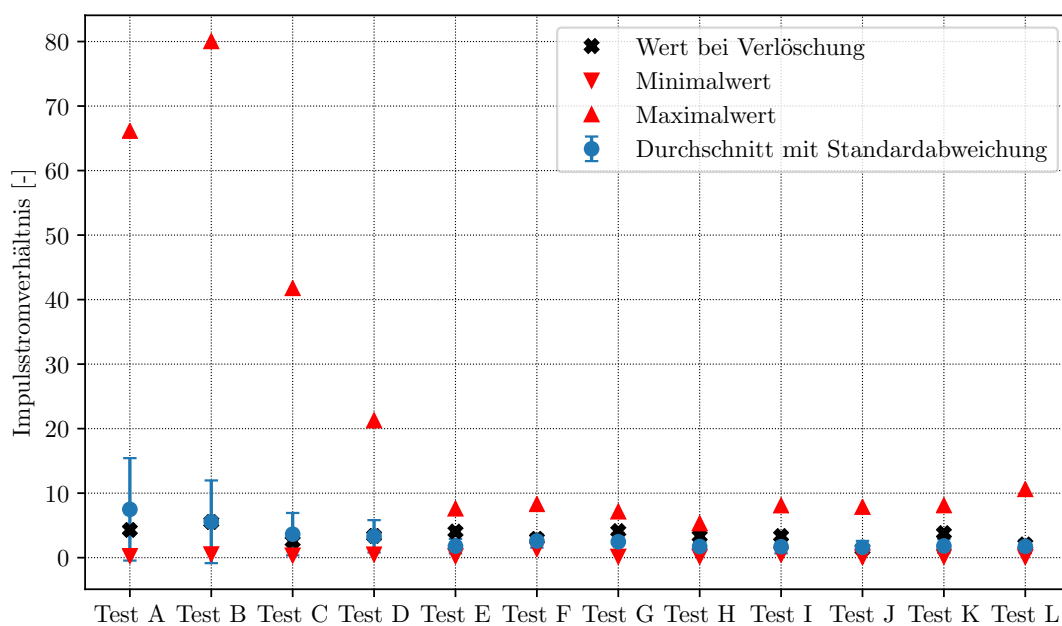


Bild B.12.: Wertebereiche, Durchschnittswerte mit Standardabweichung und Verlöschungswert aller Tests